

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



Научный журнал № 2 часть 1 2022 Сквозной номер 56  
Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

## О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

### Рубрики журнала

Проектирование и конструкция судов;  
Теория корабля и строительная механика;  
Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;  
Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные);  
Информационно-измерительные и управляющие системы;  
Системный анализ, управление и обработка информации;  
Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;  
Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;  
Математическое моделирование и численные методы.

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

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

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

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

бесплатный звонок по России 8 800 201 3897

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ».  
Тираж 100 экз.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2022



ISSN 2073-7173  
ISSN 2588-0233

# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 part 1 2022 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)  
Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

## ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

New scientific developments, research results, methods, procedures and technologies in the area of ship building, information science, computer engineering and control are published in the magazine.

The journal is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published and in the international abstract Web of Science database (Emerging Sources Citation Index ESCI), Ulrich's Knowledgebase.

Frequency of publication - 4 issues per year.

In the journal the articles shall be reviewed by leading specialists in the field of the article.

The journal is intended for a wide range of scientists and specialists, as well as heads of scientific research and design organizations, industry, educational institutions, navy, as well as teachers, postgraduate students and students of higher educational institutions.

The journal is circulated in Russia and abroad by subscription in Interregional Subscription Agency and in editorial office, as well as in exhibitions, conferences and symposiums.

### Journal headings:

- Design and construction of ships,
- Theory of ship and structural mechanics,
- Ship repair and organization of shipbuilding production,
- Ship power plants and their elements (main and auxiliary),
- Information-measuring and control systems
- System analysis, information management and processing,
- Automation and control of processes and productions,
- Computer modeling and design automation,
- Mathematical modelling, numerical procedures.

### The journal is coming since 2008

#### Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index 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](mailto: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:** Lotmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

Phone/fax +7 (812) 513-04-51

e-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto: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 advertises are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

Opinion of editorial staff and editorial board may not coincide with those of the authors of publications

#### Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2022



ISSN 2073-7173  
ISSN 2588-0233

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

[www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

## Главный редактор:

**Н.В. Никитин, д.т.н., профессор**

## Редакционная коллегия

### Заместители главного редактора

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

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

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

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

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

### Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

И.И. Костылев, д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адм.

С.О. Макарова, Санкт-Петербург

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

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

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

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

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

## Редакционный Совет Сопредседатели

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

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

### Члены Совета

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, референт генерального директора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 2073-7173  
ISSN 2588-0233

# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

[www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

**Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management**

## Chief Editor

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

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

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

## Members of Editorial Staff

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

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

## Editorial Board

### Co-chairmen

I.G. Zakharov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz", St. Petersburg, Russia  
G.A. Turichin, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

### Council Members

E.M. Appolonov, Dr. Sci. (Eng.), General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Nizhny Novgorod, Russia  
I.G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia  
G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), CEO, 51 CCIS, St. Petersburg, Russia  
D.V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Research, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
S.A. Ogai, Doctor of Engineering, Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia  
Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway  
Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland  
V.N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia  
K.V. Rozhdestvenskij, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

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

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Александр Исаакович Фрумен**, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Ильич Королев**, к.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова
- **Олег Николаевич Петров**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Минас Арменакович Минасян**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Андрей Борисович Фомичев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Борис Петрович Ионов**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Петрович Марков**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Абдурашид Яруллаевич Яфасов**, доктор технических наук, Калининградский государственный технический университет
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова
- **Сергей Васильевич Федоров**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Юлия Олеговна Плехова**, доктор экономических наук, профессор, Институт экономики и предпринимательства ННГУ им. Н.И.Лобаческого
- **Анатолий Владимирович Букшев**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Семёнович Федосенко**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Сергей Юрьевич Развозов**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Владимир Анатольевич Жуков**, доктор технических наук, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова
- **Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

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

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

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

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



# 51

центральный  
конструкторско - технологический  
институт судоремонта

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ	Стр.
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ</b>	
<b>Кушнер Г.А.</b> Экспериментальное маломерное судно для исследований колебаний системы валопровода.....	14
<b>Огай С.А., Войлошников М.В., Огай А.С.</b> Вероятностная оценка показателей при определении характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования гражданских судов.....	19
<b>ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>Козин В.М.</b> Возможности увеличения прочности ледяного покрова путем его армирования.....	29
<b>Зарубина Д.В., Пищальник В.М., Романюк В.А.</b> Оценка вероятности встречи со льдом в Татарском проливе на маршруте Де-Кастри – кромка.....	35
<b>ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>Дзюнин Г.Р., Русановский С.А., Худяков М.П., Деснев Д.Л.</b> Метод косвенного контроля формы оболочечных конструкций глубоководных аппаратов с применением современных средств измерений.....	42
<b>Гальцов И.А., Фомин Е.В.</b> , Совершенствование технологии сварки плакированной стали PCF36Z+316L при постройке морских стационарных буровых платформ.....	51
<b>Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В.</b> Применение мобильных устройств магнитного типа для очистки поверхностей корпусов судов.....	57
<b>Саламех Али, Алсаид Мазен</b> Исследование долговечности судовых надстроек из композиционного материала при соединении со стальным корпусом .....	64
<b>СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)</b>	
<b>Руднев Б.И., Повалихина О.В.</b> Контрольно-измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля.....	73
<b>Лапин Ю.А., Ханнанов А.М., Портнова О.С., Куренский А.В.</b> Разработка стенда для исследования характеристик демпферов крутильных колебаний судовых валопроводов.....	79
<b>Симашов Р.Р., Чехранов С.В.</b> Определение газодинамических характеристик сопловых аппаратов со сверхзвуковыми прямоугольными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин.....	83
<b>Бевза Д.И., Шураев О.П.</b> Влияние конструкционных и режимных параметров на тепловые и газодинамические характеристики судового компактного котла-utiлизатора.....	88
<b>Туркин В.А., Стяжкин А.А.</b> Влияние типа используемого теплоизоляционного материала на состояние кирпичной кладки судовых котлов.....	97
<b>Полковников А.К., Полковникова Н.А.</b> Анализ отказов крейцкопфных подшипников судовых дизелей.....	104
<b>ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ</b>	
<b>Амбросовская Е.Б., Амбросовский В.М., Ромаев Д.В., Калимов Д.В.</b> Применение методов обработки сигналов в частотной области при анализе данных систем автоматического управления движением судов.....	112
<b>Амбросовский В.М.</b> Система предотвращения аварий движения скоростных морских подвижных объектов.....	120
<b>Коренев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г.</b> Использование решения задачи "машины Дубинса" для исключения ситуации опасного сближения двух судов.....	127
<b>СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ</b>	
<b>Филатов В.И.</b> Построение слоёв гидрометеорологических данных и их интерполяции методом бикубического сплайна.....	136
<b>Асланов Т.Г., Айгумов Т.Г.</b> Имитация работы донных сейсмографов с применением искусственных нейронных сетей.....	143

<b>Павликов С.Н., Копаева Е.Ю., Колесов Ю.Ю., Петров П.Н., Гареева М.А.</b> Информационное обеспечение безопасности полетов на морском транспорте.....	149
<b>Сатаев А.А., Самойлов А.М., Блохин А.А., Андреев В.В.</b> Системное исследование процессов теплообмена в условиях принудительной и естественной циркуляции при внешнем динамическом воздействии.....	155
<b>Дюк В.А., Малыгин И.Г., Прицкер В.И.</b> Распознавание транспортных средств по силуэтам – трехкаскадный метод машинного обучения в системах технического зрения.....	162
<b>Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Кузнецова Е.Ю., Маринов М.Л.</b> Оценка влияния свойств судна на его экологическую безопасность.....	168
<b>Астреин В.В., Филатов В.И.</b> Ситуационная модель автоматического мониторинга безопасности судовождения. Морские интеллектуальные технологии.....	174
<b>Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородина О.В.</b> Когнитивный алгоритм трехмерного дискретного косинусного преобразования морских сюжетов.....	185
<b>Латынцева С.В., Скороходов Д.А., Степанов И.В., Турусов С.Н.</b> Риск-ориентированный подход к созданию программного обеспечения систем управления эксплуатацией морских технологических комплексов.....	193
<b>Кузнецова Е.Ю., Кириченко А.В., Михайлова М.Ю., Турусов С.Н.</b> Формирование интеллектуальной системы мониторинга экологической обстановки Северного морского пути.....	201
<b>АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ</b>	
<b>Грошева Л.С., Плющаев В.И.</b> Динамические характеристики колесного судна при реализации швартовых операций с учетом внешних воздействий.....	210
<b>Домнина О.Л.</b> Оценка риска экологических и эксплуатационных последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами (на примере Волжского бассейна).....	218
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ</b>	
<b>Огай А.С., Войлошников М.В., Огай С.А.</b> Исходные модели для построения целевых функций морских гражданских судов при определении их характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования.....	226
<b>Юдин Ю.И., Позняков С.И.</b> Прогнозирование изменения курса судна в процессе маневрирования..	238
<b>Седова Н.А., Седов В.А., Баженов Р.И., Денисов И.В., Бекназарова С.С.</b> Нейро-нечеткий подход для анализа опасности столкновения для морского судна.....	245
<b>Ольшанский В.В., Мартемьянов С.В., Сафонцева Н.Ю., Гунько В.Б.</b> Повышение точности местоопределения объектов вторжения радиолокационными средствами обнаружения со сверхсканированием.....	252
<b>Домнина О.Л., Липатов И.В.</b> Влияние гидроморфологических особенностей речного русла на характер распределения шлейфа загрязнения нефтью при авариях судов.....	258
<b>Наумов В.С., Пластиинин А.Е., Волкова Н.И., Шапошников А.Д.</b> Оценка опасности и локализация пожаров разлияния нефтепродуктов на водных объектах.....	269

CONTENTS	Page
<b>DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS</b>	
<b>Guriy A. Kushner</b> Experimental small craft for researching the vibrations of the shafting system.....	14
<b>Sergei A. Ogai, Michael V. Voyloshnikov, Alexey S. Ogai</b> The probabilistic evaluation of the indexes in determining of characteristics and particulars at the initial stages of merchant ships designing.....	19
<b>THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS</b>	
<b>Viktor M. Kozin</b> The possibility of increasing the strength of the ice cover by reinforcing it.....	29
<b>Daria V. Zarubina, Vladimir M. Pishchalnik, Valery A. Romanyuk</b> Probability estimation of ice encounter in the Tatar Strait on the route De-Kastri - the ice edge.....	35
<b>SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION</b>	
<b>Georgiy R. Dzyunin, Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, Dmitriy L. Desnev</b> The method of indirect control of the shape of underwater shipbuilding hulls with the use of modern measuring instruments.....	42
<b>Igor A. Galjcov, Evgeny V. Fomin</b> , Improvement of PCF36Z + 316L clad steel welding technology in the construction of offshore stationary drilling platforms.....	51
<b>Sergey I. Koryagin, Nikolay L. Velikanov, Oleg V. Sharkov</b> The use of mobile devices of magnetic type for cleaning the surfaces of ship hulls.....	57
<b>Salamekh Ali, Alsaid Mazen</b> Investigation of the durability of ship's superstructures made from composite materials while connecting a steel hull.....	64
<b>SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)</b>	
<b>Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina</b> Control measured complex for the investigation of parameters of operation process and radiative convection heat transfer in the combustion chamber of a marine high speed diesel engine.....	73
<b>Yury A. Lapin, Andrei M. Hannanov, Olesya S. Portnova, Alexey V. Kurenskiy</b> Development of a laboratory-scale plant for the study of the characteristics of torsional vibration dampers of ship shaft lines.	79
<b>Rafail R. Simashov, Sergei V. Chekhranov</b> Determination of gas-dynamic characteristics of nozzle diaphragms with supersonic rectangular nozzles in the modeling of variable duties of low-consumption turbines.....	83
<b>Denis I. Bevza, Oleg P. Shurayev</b> Influence of structural and operating parameters on thermal and gas dynamic characteristics of the vessel's compact exhaust boiler.....	88
<b>Vladimir A. Turkin, Alexander A. Styazhkin</b> Influence of the type of the heat-insulating material used on the state of the brickling of ship boilers.....	97
<b>Anatoly K. Polkovnikov, Natalia A. Polkovnikova</b> Failure's analysis of marine diesel engines crosshead bearings.....	104
<b>INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS</b>	
<b>Elena B. Ambrosovskaya, Victor M. Ambrosovsky, Dmitry V. Romaev, Daniil V. Kalimov</b> Frequency-domain signal processing application in ship motion control systems.....	112
<b>Victor M. Ambrosovsky</b> Accident prevention of motion system for high-speed marine mobile objects.....	120
<b>Alexei S. Korenev, Sergei P. Khabarov, Andrei G. Shpectorov</b> Application of the Dubins path problem to avoid the dangerously close approach of two vessels.....	127
<b>SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING</b>	
<b>Viktor I. Filatov</b> Hydrometeorological data layers of plotting and it's interpolation by b-cubic splines.....	136
<b>Tagirbek G. Aslanov, Timur G. Aygumov</b> Simulation of the operation of bottom seismographs using artificial neural networks.....	143
<b>Sergey N. Pavlikov, Ekaterina Yu. Kopaeva, Yuriy Yu. Kolesov, Pavel N. Petrov, Marina A. Gareeva</b> Information support of flight safety in maritime transport.....	149
<b>Aleksandr A. Sataev, Aleksandr M. Samoilov, Alexei A. Blokhin, Vyacheslav V. Andreev</b> . System research of heat exchange processes under forced and natural circulation under external dynamic impact	155

<b>Vyacheslav A. Duke, Igor G. Malygin, Vladimir I. Pritsker.</b> Vehicle recognition by silhouettes – a three-stage machine learning method in computer vision systems.....	162
<b>Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Elena Y. Kuznetsova, Marin L. Marinov.</b> Assessment of the impact of the ship's properties on its environmental safety.....	168
<b>Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov</b> Automatic situational monitoring System for Navigation Safety.....	174
<b>Shakeeb S. Fahmi, Natalia V. Shatalova, Elena V. Kostikova, Olga V. Borodina</b> A cognitive algorithm for three-dimensional discrete cosine Transformation of marine images.....	185
<b>Svetlana V. Latyntseva, Dmitriy A. Skorohodov, Ilia V. Stepanov, Sergey N. Turusov,</b> The risk-based approach to creation of the software of management systems operation of sea technology complexes.....	193
<b>Elena Y. Kuznetsova, Aleksandr V. Kirichenko, Mariya Y. Mikhailova, Sergey N. Turusov</b> Formation of an intelligent system for monitoring the environmental situation of the Northern Sea Route.....	201
<b>AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTION</b>	
<b>Lyudmila S. Grosheva, Valeri I. Plyushchaev</b> Dynamic characteristics of a wheeled vessel during mooring operations with regard to external influences.....	210
<b>Olga L. Domnina</b> Assessment of the risk of environmental and operational consequences from transport accidents with dry cargo ships (on the example of the Volga basin).....	218
<b>MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES</b>	
<b>Alexey S. Ogai, Michael V. Voyloshnikov, Sergei A. Ogai</b> The basic models for the objective functions creating of merchant ships in determining their characteristics and particulars at the initial stages of designing.....	226
<b>Yuri I. Yudin, Sergey I. Poznjakov</b> Predicting changes in the ship's course during maneuvering.....	238
<b>Nelly A. Sedova, Victor A. Sedov, Ruslan I. Bazhenov, Igor V. Denisov, Saida S. Beknazarova</b> Neuro-fuzzy approach for collision risk analysis for a sea ship.....	245
<b>Vladimir V. Olshanskiy, Sergei V. Martemyanov, Natalia Yu. Safontseva, Vitaly B. Gunko</b> Improving the accuracy of locating invasion objects by radar detection means with superscanning.....	252
<b>Olga L. Domnina, Igor V. Lipatov</b> The Influence of Hydromorphological Features of the River Channel on the Distribution of the Oil Pollution Plume during Ship Accidents.....	258
<b>Viktor S. Naumov, Andrey E. Plastinin, Nadezhda I. Volkova, Alexei D. Shaposhnikov</b> Hazard assessment and localization of oil spill fires at water bodies.....	269

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.125: 624.072.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.001>

### Экспериментальное маломерное судно для исследований колебаний системы валопровода

Г.А. Кушнер<sup>1</sup> guriy.kushner@mail.ru

<sup>1</sup>Астраханский Государственный Технический Университет

**Аннотация.** Работа посвящена решению научно-технической задачи по созданию маломерного судна для проведения исследований поперечных, крутильных и продольных колебаний системы валопровода, позволяющего расширить диапазон экспериментальных исследований и получить массив экспериментальных данных для дальнейшей обработки. Рассмотрены существующие методы изучения колебаний системы судового валопровода, отмечена необходимость их совершенствования в части валидности получаемых данных. Приведена конструкция экспериментального маломерного судна для исследований колебаний системы валопровода, основные характеристики энергетической установки и корпуса. Основным преимуществом предложенной конструкции является возможность проведения экспериментальных исследований без использования внешнего подвода энергии для вращения валопровода, а также варьирование частот и амплитуд колебаний крутящего момента. Приведен порядок проведения экспериментальных исследований, а также способы регистрации изменений напряженно-деформированного состояния и колебаний валов энергетической установки. Проведен результат первичного анализа полученных в процессе ходовых испытаний экспериментальных данных. Сделан вывод о наличии зон динамической неустойчивости валопровода при определенных частотах вращения и условиях нагружения. Предложенная конструкция маломерного судна позволяет проводить многофакторные экспериментальные исследования поперечных, крутильных и продольных колебаний.

**Ключевые слова:** экспериментальное судно, судовой валопровод, тензометрирование, резонанс колебаний, механические напряжения.

**Для цитирования:** Кушнер Г.А. Экспериментальное маломерное судно для исследований колебаний системы валопровода. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1, С. 14—18.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.001>

### Experimental small craft for researching the vibrations of the shafting system

Guriy A. Kushner<sup>1</sup> guriy.kushner@mail.ru

<sup>1</sup>Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

**Abstract.** The study is devoted to scientific and technical problem of creating a small craft for conducting studies of transverse, torsional and longitudinal vibrations of the shafting system, which makes it possible to expand the range of experimental studies and obtain an array of experimental data for further processing. Existing methods for studying the vibrations of the ship shafting system are considered. The need for studying methods improvement in terms of the validity of the obtained data is noted. The design of an experimental small craft for the study of vibrations of the shafting system, the main characteristics of the power plant and hull are given. The main advantage of the proposed design is the possibility of conducting experimental studies without using an external energy supply for shafting rotation, as well as varying the frequencies and amplitudes of torque oscillations. The procedure for conducting experimental studies, as well as methods for recording changes in the stress-strain state and oscillations of the shafts of the power plant are given. The result of the primary analysis of the experimental data obtained during sea trials has been carried out. The conclusion is made about the presence of zones of dynamic instability of the shafting at certain speeds and loading conditions. The proposed design of a small craft allows for multifactorial experimental studies of transverse, torsional and longitudinal vibrations.

**Keywords:** experimental vessel, ship shafting, strain gauge, vibration resonance, mechanical stresses.

**For citation:** Guriy A. Kushner, Experimental small craft for researching the vibrations of the shafting system, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 14—18.

#### Введение

Судовой валопровод эксплуатируется в условиях постоянных, периодических и случайных нагрузок. Существенная часть действующих на систему валопровода нагрузок достаточно изучена и

учитывается проектантами уже на первоначальных расчетах. Другая часть нагрузок, например, связанных с инерционными силами от масс гребного винта и вала при качке судна и волнении, усилиями на гребном винте при работе в изменяющемся потоке воды, усилиями от механической и

гидродинамической неуравновешенности и прочих, является предметом исследований в отечественных [1,2] и зарубежных работах [3,4]. Совокупность приложенных к судовому валопроводу нагрузок оказывает непосредственное влияние на его работоспособность, в частности, приводя к резонансам колебаний.

В существующей практике экспериментального изучения колебаний судового валопровода применяется два подхода: проектирование и изготовление экспериментальных установок, моделирующих напряженно-деформированное эксплуатационное состояние [5,6], а также регистрация и интерпретация получаемых данных с натурного судна [7,8]. Основными недостатками первого подхода являются допущение о том, что имитируемые на установках нагрузки соответствуют реальным (увеличение количества нагрузок приводит к существенному усложнению и ее удорожанию эксперимента), а также невозможность проведения исследований в условиях реальной эксплуатации с учетом действующих гидродинамических нагрузок, создаваемых гребным винтом. Второй подход, как правило, заключается в оценке фактических параметров колебаний валопровода в эксплуатации и не позволяет планировать полноценные многофакторные эксперименты.

В работе решена задача создания маломерного судна для изучения параметров продольных, поперечных и крутильных колебаний системы валопровода, позволяющего расширить диапазон экспериментальных исследований и получить

массив экспериментальных данных для дальнейшей обработки.

### Конструкция судна

Согласно техническому регламенту таможенного союза разработка относится к экспериментальным маломерным судам, предназначенным для проведения опытно-конструкторских, экспериментальных и научно-исследовательских работ.

На рис. 1 представлена конструкция предлагаемого в работе маломерного судна для исследования продольных, поперечных и крутильных колебаний системы валопровода. Внутри корпуса судна на фундаменте установлен поршневой двигатель внутреннего сгорания, приводящий в движение систему валопровода через клиноременную передачу. Система валопровода состоит из упорного, промежуточного и гребного валов, соединенных фланцами. Промежуточный вал и гребной вал размещены на подвижных опорах скольжения. Опоры промежуточного вала могут перемещаться и быть закрепленными на фундаменте, а опоры гребного вала расположены внутри дейдвудной трубы. На кормовом конце гребного вала закреплен гребной винт, упор от которого передается на упорный подшипник. В носовой части гребного вала размещена измерительная аппаратура для регистрации параметров колебаний. Водонепроницаемость корпуса обеспечивается носовым и кормовым уплотнениями дейдвудной трубы. В кормовой части корпуса закреплено рулевое устройство.

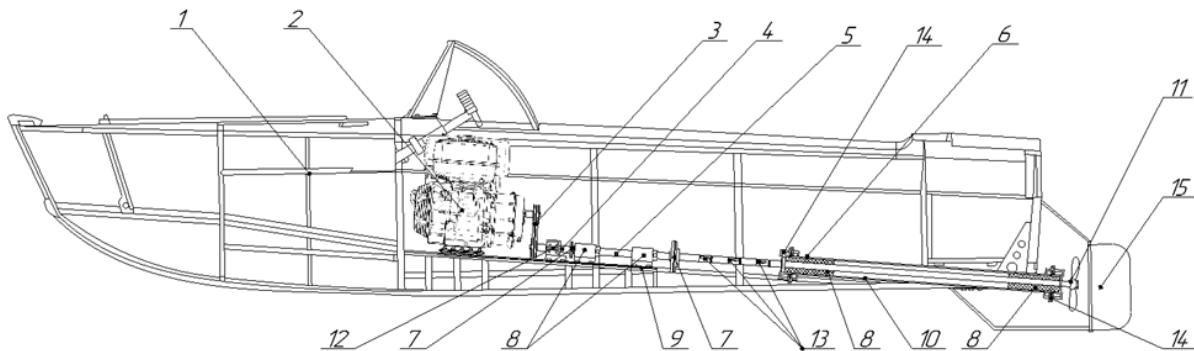


Рис. 1. Конструкция экспериментального маломерного судна для исследований колебаний системы валопровода:

- 1 – корпус маломерного судна; 2 – поршневой ДВС; 3 – клиноременная передача; 4 – упорный вал;
- 5 – промежуточный вал; 6 – гребной вал; 7 – фланцевые соединения; 8 – подвижные опоры; 9 – фундамент;
- 10 – дейдвудная труба; 11 – гребной винт; 12 – упорный подшипник; 13 – измерительная аппаратура;
- 14 – уплотнения гребного вала; 15 – рулевое устройство

### Основные характеристики

В состав машино-движительного комплекса судна входят главный двигатель LIFAN 190FD-R (мощность: 10.5 кВт, рабочий объем: 420 см<sup>3</sup>, количество тактов: 4) с диапазоном частоты вращения от 100 об/мин до 4000 об/мин (номинальная 2500 об/мин); понижающая клиноременная передача ( $i=1\dots 3$ ), упорный вал; промежуточный вал; гребной вал; винт фиксированного шага.

К номинальным характеристикам корпуса относятся: категория сложности района плавания –

кс IVpIV; материал корпуса – дюраль; допустимая мощность двигателя – 29,4 кВт.

Главные размерения: длина корпуса наибольшая (м) – 4,65; ширина корпуса наибольшая (м) – 1,7; максимальная осадка (м) – 0,25; водоизмещение (т) – 0,797; максимальное количество людей на борту – 5; наибольшая нагрузка, дедвейт (т) – 0,525; масса укомплектованного судна (кг) – 272; максимальная высота волны (м) – 0,6; минимальный надводный борт (м) – 0,47.

Использование в конструкции устройства поршневого двигателя внутреннего сгорания позволяет обеспечить проведение экспериментов

без использования внешнего подвода энергии для вращения валопровода, а также изменять различные частоты и амплитуды колебаний крутящего момента на валопроводе, создаваемых силами давления газов на поршни рабочих цилиндров.

Система из гребного, промежуточного и упорного валов приводится во вращение при помощи клиноременной передачи с возможностью быстрой смены шкивов, что, в совокупности с гребным винтом со съемными лопастями, позволяет проводить исследования в большем диапазоне рабочих частот вращения валопровода, а также варьировать величину создаваемого гребным винтом упора.

Выполнение гребного вала с открытой частью позволяет разместить на его поверхности различные датчики и аппаратуру для регистрации и измерений колебаний, а также передачи экспериментальных данных с вращающегося вала на стационарный приемник. Конструкция дополнительно позволяет произвести замену дейдвудных подшипников и лопастей гребного винта в сокращенные сроки при подъеме оконечности корпуса.

Размещение всех элементов экспериментальной установки внутри корпуса маломерного судна упрощает постановку и проведение исследований, повышает точность и валидность получаемых данных, а также позволяет проводить многофакторные экспериментальные исследования валопровода в условиях эксплуатации с учетом реальных гидродинамических нагрузок, создаваемых гребным винтом.

### Особенности проведения экспериментальных исследований

Судно для проведения экспериментальных исследований спускается на воду при помощи крана или специальных тележек с кильблоками. В носовой части гребного вала закрепляется измерительная аппаратура – тензорезисторы с аналогово-цифровыми преобразователями, цифровые акселерометры, датчики частоты вращения, радиопередатчики, аккумуляторная батарея и прочие. Двигатель внутреннего сгорания через клиноременную передачу приводит во вращение систему валопровода, приводя судно в движение относительно поверхности воды. Управление судном производится при помощи изменения частоты вращения валопровода и изменением положения рулевого устройства относительно корпуса.

Проведенные сокращенные ходовые испытания (рис. 2) установили: скорость судна достигает 10 узлов, диаметр установившейся циркуляции 14 метров, фактический расход топлива 400 г/кВт·ч.



Рис. 2. Ходовые испытания экспериментального маломерного судна в акватории реки Волга

Регистрация деформаций растяжения, сжатия и кручения валопровода, возникающих в процессе его работы при продольных, поперечных и крутильных колебаниях производится с помощью тензометрирования и измерений цифровыми акселерометрами при помощи устройства, предложенного автором [9].

Следует дополнительно отметить, что конструкция энергетической установки судна не исключает возможности регистрации параметров колебаний известными способами [10]. Передача данных с измерительной аппаратурой производится по каналу радиосвязи с использованием беспроводного интерфейса для динамического тензометрирования [11]. Подача питания на измерительную аппаратуру, размещенную в носовой части гребного вала, возможна с помощью закрепления на вале аккумуляторной батареи, либо с использованием кольцевого токосъемника.

Расширение диапазона экспериментальных исследований обусловлено тем, что в конструкции судна возможно: изменять материал, длину и зазоры в опорах валопровода, а также расстояние между ними; материалы и диаметры упорного вала, промежуточного вала и гребного вала; частоту вращения валопровода путем изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя, смены шкивов клиноременной передачи, что, в совокупности с гребным винтом со съемными лопастями, позволяет варьировать величины создаваемого гребным винтом упора и гидродинамическую нагрузку на валопровод. С учетом требований проведения измерений при малой выборке, в экспериментах возможно использовать небольшое число параллельных измерений, получая адекватный массив экспериментальных данных.

На рис.3,4 приведены фрагменты полученных в процессе ходовых испытаний экспериментальных данных. Регистрация показаний измерительной аппаратуры производилась на спецификационных режимах силовой установки на передний ход при плавном изменении частоты вращения коленчатого вала двигателя от минимально устойчивой до максимальной и обратно. Согласно представленным тензограммам колебаний валопровода можно сделать вывод о наличии зон динамической неустойчивости валопровода при следующих частотах вращения  $n$ : резонанс крутильных колебаний от 570 об/мин до 600 об/мин, резонанс поперечных колебаний от 450 об/мин до 520 об/мин.

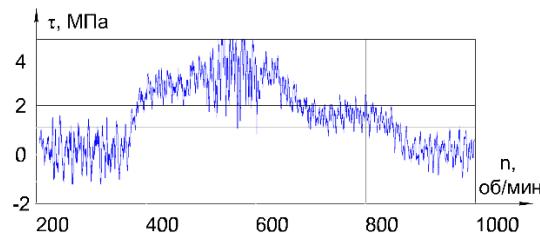


Рис. 3. Тензограмма крутильных колебаний

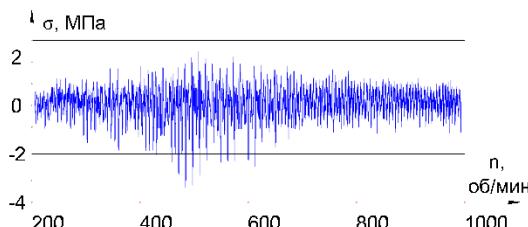


Рис. 4. Тензограмма поперечных колебаний

Касательные напряжения от крутильных колебаний на частоте вращения 580 об/мин для гребного вала составили 4,5 МПа при угле закручивания 0,2 град, а нормальные напряжения от поперечных колебаний на частоте вращения 580 об/мин равны 3,1 МПа.

Следует отметить, что частоты, полученные в результате расчетов для крутильных колебаний по методике В.П. Терских (валопровод исследуемого судна не имеет элементов с нелинейным демпфированием) соответствуют экспериментально полученным при частоте вращения коленчатого вала 2250 об/мин.

Собственные частоты поперечных колебаний, рассчитанные в соответствии с РД 5.4307 по методу Ю.А. Шиманского составили в вертикальной плоскости  $65,9\text{c}^{-1}$  при частоте вращения гребного вала 630 об/мин; в горизонтальной плоскости  $63,8\text{c}^{-1}$  при частоте вращения гребного вала 610 об/мин. Возникновение резонанса поперечных колебаний на частотах меньше расчётных отмечено в работе [7], и требует дальнейшего изучения.

## Заключение

Экспериментальные данные, полученные при помощи измерительных систем, внедренных в энергетическую установку судна, позволили установить область динамической неустойчивости валопровода при заданных частотах вращения.

Проведение последующих экспериментальных исследований и обработка массива полученных данных позволит изучить совместное влияние колебаний на работоспособность судового валопровода. Результаты проводимых исследований могут быть распространены на конструктивно схожие валопроводы на основе геометрической, кинематической и динамической схожести процессов.

Предложенная конструкция маломерного судна позволяет изучать продольные, поперечные и крутильные колебания натурного судового валопровода, а также проводить многофакторные эксперименты по изучению напряжённо-деформированного состояния и колебаний валов с использованием телеметрических измерительных систем. Экономическая целесообразность использования предлагаемой конструкции зависит от объема исследований и границ варьирования факторов, например, при постановке и проведении аналогичного [7] эксперимента о влиянии зазора в дейдвудном подшипнике на частоту поперечных колебаний гребного вала экономия составит около 60%.

Проведение испытаний на предлагаемой конструкции судна позволяет существенно упростить получение экспериментальных данных в условиях реальной эксплуатации без использования натурной судовой энергетической установки.

## Литература

1. Сапига В. В., Кирюхин А. Л., Черпита П. В. Совершенствование методов анализа динамики судовых валопроводов //Водный транспорт. 2014. № 1. С. 52-61.
2. Кукарина А. Ю., Миронов А. И., Рубан А. Р. Влияние износов дейдвудных подшипников и гидродинамического момента на устойчивость вращения гребного вала //Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. №. 1 (35). С. 145-153.
3. Huang, Q. et al. Vibration analysis of marine propulsion shafting by the coupled finite element method // Journal of Vibroengineering. 2015. Т. 17. №. 7. Р. 3392-3403.
4. Han H. S., Lee K. H., Park S. H. Parametric study to identify the cause of high torsional vibration of the propulsion shaft in the ship //Engineering Failure Analysis. 2016. Т. 59. С. 334-346.
5. Халявкин А. А., Кушнер Г. А., Мамонтов В. А. Экспериментальная установка для исследования параметрических колебаний валопроводов судов //Эксплуатация морского транспорта. 2015. №. 1. С. 39-42.
6. Покусаев М. Н., Сибряев К. О., Горбачёв М. М. Сравнительные испытания модельного демпфера крутильных колебаний при использовании различных видов наполнителей //Транспортное дело России. 2016. №. 3. С. 102-105.
7. Кушнер Г. А. и др. Экспериментальное исследование поперечных колебаний валопровода судна проекта ВКМ-3 // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. №. 1. С. 77-80.
8. Покусаев М. Н. и др. Исследование крутильных колебаний машинно-движительного комплекса разъездного речного судна «РК-2091» проекта 376 // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №. 1-4. С. 88-92.
9. Пат. 2761142 Российской Федерации, МПК G01M 15/00(2021.08), G01M 15/02(2021.08). Телеметрический комплекс технического диагностирования судового валопровода / Г.А. Кушнер; заявитель и патентообладатель Г.А. Кушнер. №2021106890; заявл. 16.03.2021; приор. 21.12.2020; опубл. 06.12.2021, Бюл. № 34, 7с.; ил.
10. Ярещенко В. Г. Экспериментальное исследование процессов скоростного деформирования методом динамического широкополосного тензометрирования //Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2014. №. 3. С. 103-110.
11. Kushner G.A. (2021) Dynamic strain measurement of propeller shaft vibrations. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2091, 5th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2021) 4-7 October 2021, Astrakhan, Russian Federation, doi:10.1088/1742-6596/2091/1/012050 (G A Kushner 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2091 012050)

### References

1. Sapiga V.V., Kiryukhin A.L., Cherpita P.V. (2014) Sovershenstvovaniye metodov analiza dinamiki sudovykh valoprovodov [Improvement of methods for analyzing the dynamics of ship shaft shafts] Vodniy transport. № 1. Pp. 52-61.
2. Kukarina A. YU., Mironov A. I., Ruban A. R. (2016) Vliyaniye iznosov deydvudnykh podshipnikov i gidrodinamicheskogo momenta na ustoychivost' vrashcheniya grebnogo vala [Influence of wear of stern bearings and hydrodynamic moment on the stability of rotation of the propeller shaft] Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. № 1 (35). Pp. 143-153.
3. Huang, Q. et al. Vibration analysis of marine propulsion shafting by the coupled finite element method // Journal of Vibroengineering. 2015. T. 17. №. 7. P. 3392-3403.
4. Han H. S., Lee K. H., Park S. H. Parametric study to identify the cause of high torsional vibration of the propulsion shaft in the ship //Engineering Failure Analysis. 2016. T. 59. C. 334-346.
5. Khalyavkin A. A., Kushner G. A., Mamontov V. A. (2015) Eksperimental'naya ustavok dlya issledovaniya parametricheskikh kolebaniy valoprovodov sudov [Experimental setup for the study of parametric oscillations of ship shafting] Ekspluatatsiya morskogo transporta. № 1. Pp. 39-42.
6. Pokusayev M. N., Sibryayev K. O., Gorbachov M. M. (2016) Sravnitel'nyye ispytaniya model'nogo dempfera krutil'nykh kolebaniy pri ispol'zovanii razlichnykh vidov napolniteley [Comparative tests of a model torsional vibration damper using various types of fillers] Transportnoye delo Rossii. №. 3. Pp. 102-105.
7. Kushner G. A. et al. (2018) Eksperimental'noye issledovaniye poperechnykh kolebaniy valoprovoda sudna proyekta VKM-3 [Experimental study of transverse vibrations of the shafting of the vessel of the VKM-3 project] Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. №. 1. Pp. 77-80.
8. Pokusayev M. N. et al. (2019) Issledovaniye krutil'nykh kolebaniy mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa raz"yezdnogo rechnogo sudna «RK-2091» proyekta 376 [Investigation of torsional vibrations of the machine-propulsion complex of the crew river vessel "RK-2091" of project 376]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. №. 1-4. Pp. 88-92.
9. Invention Patent №2761142 Russian Federation, IPC G01M 15/00(2021.08), G01M 15/02(2021.08). Telemetricheskiy kompleks tekhnicheskogo diagnostirovaniya sudovogo valoprovoda [Telemetric complex for technical diagnostics of ship shafting] G.A. Kushner; applicant and patent holder G.A. Kushner. No. 2021106890; publ. 06.12.2021, Bull. No. 34, 7p.; ill.
10. Yareshchenko V. G. (2014) Eksperimental'noye issledovaniye protsessov skorostnogo deformirovaniya metodom dina-micheskogo shirokopolosnogo tenzometrirovaniya [Experimental study of the processes of high-speed deformation by the method of dynamic broadband strain gauge] Voprosy proyektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatel'nykh apparatov. № 3. Pp. 103-110.
11. Kushner G.A. (2021) Dynamic strain measurement of propeller shaft vibrations. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2091, 5th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2021) 4-7 October 2021, Astrakhan, Russian Federation, doi:10.1088/1742-6596/2091/1/012050 (G A Kushner 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2091 012050).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Гурий Алексеевич Кушнер**, кандидат технических наук, доцент кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники, Астраханский Государственный Технический Университет, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: guriy.kushner@mail.ru

**Guriy A. Kushner**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering, Tatisheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: guriy.kushner@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.01.2022.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.03.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 16.04.2022.

**Научная статья**

УДК 629.12.001.24:681.32

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.002>

## **Вероятностная оценка показателей при определении характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования гражданских судов**

**С.А. Огай<sup>1</sup>** ogay@msun.ru, **М.В. Войлошников<sup>1</sup>** michael.vladlen@gmail.com, **А.С. Огай<sup>1</sup>** ogay\_a@msun.ru

<sup>1</sup>Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

**Аннотация.** При определении характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования морских гражданских судов используются критерии оптимальности в форме целевых функций – зависимостей критериев от данных (проектных ограничений), варьируемых переменных характеристик и элементов судна и параметров (условно постоянных значений элементов). Помимо алгоритмических свойств целевых функций, находящихся в зависимости от указанных данных, переменных и параметров, характерны также вероятностные свойства (характеристики плотности вероятности распределения, математические ожидания, дисперсии, интегральные функции вероятности), поскольку при нахождении данных и параметров для целевых функций используются методы, основанные на статистических наблюдениях, которые дают вероятностные свойства данным и параметрам, а также потому, что часть характеристик судна, например, независимые слагаемые водоизмещения и суммарное водоизмещение судна в грузу, находятся в зависимости имеющей вероятностную природу, при которой соотношение характеристик предопределяется вероятностной совокупностью факторов, влияние каждого из которых в отдельности несущественно. Явное влияние на вероятностные свойства критериев оказывает показатель дисконтирования – совокупности учитываемых в критериях коммерческих рисков, который показывает также стоимость капиталовложений и служит в критериях фактором баланса единовременных инвестиций и денежных потоков. При условии строгой монотонности зависимости экономических критериев от показателя дисконтирования производятся математические преобразования, позволяющие найти вероятностные характеристики критериев, применяемых в качестве целевых функций.

**Ключевые слова:** характеристика судна, проектный элемент судна, проектная оптимизация, критерий эффективности, критерий оптимальности, целевая функция, проектное ограничение, плотность вероятности, интегральная функция вероятности, ставка дисконтирования, коммерческие риски

**Для цитирования:** Огай С.А., Войлошников М.В., Огай А.С. Вероятностная оценка показателей при определении характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования гражданских судов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 19—28.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.002>

## **The probabilistic evaluation of the indexes in determining of characteristics and particulars at the initial stages of merchant ships designing**

**Sergei A. Ogai<sup>1</sup>** ogay@msun.ru, **Michael V. Voyloshnikov<sup>1</sup>** michael.vladlen@gmail.com,  
**Alexey S. Ogai<sup>1</sup>** ogay\_a@msun.ru

<sup>1</sup>Maritime state university named Admiral Nevelskoi

**Abstract.** When determining the characteristics and particulars at the initial stages of designing merchant ships, the optimality criteria are used in the form of objective functions – the dependencies of the criteria on the data (the design constraints), the variable characteristics and the particulars of the ship and the parameters (the conditionally constant values of the particulars). In addition to the algorithmic properties of objective functions that depend on the specified data, variables and parameters, the probabilistic properties are also characteristic (the characteristics of the probability density of distribution, the mathematical expectations and variances, the integral probability functions), since when finding the data and the parameters for objective functions, the methods based on statistical observations that give the probabilistic properties to data and parameters, and also because some of the characteristics of the ship, for example, the independent components of displacement and the total displacement of the ship with cargo, are dependent on probabilistic nature, in which the ratio of characteristics is predetermined by the probabilistic set of factors, the influence each of which is individually insignificant. The clear influence on the probabilistic properties of the criteria is provided by the discount rate – the totality of commercial risks taken into account in the criteria, which also shows the of capital investments cost and serves the factor in the balance of one-time investments and cash flows in the criteria. Under the condition of strict monotonicity of the dependence of economic criteria on the discounting index, the mathematical transformations are made to find the probabilistic characteristics of the criteria used as objective functions.

**Keywords:** the ship characteristic, ship design particular, design optimization, efficiency criterion, optimality criterion, objective function, design constraint, probability density, probability integral function, discount rate, commercial risks

**For citation:** Sergei A. Ogai, Michael V. Voyloshnikov, Alexey S. Ogai The probabilistic evaluation of the indexes in determining of characteristics and particulars at the initial stages of merchant ships designing, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 19—28.

## Введение

При нахождении характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования морских гражданских судов [1, 2, 6 и 9] нужно учитывать вероятностные свойства этих характеристик и элементов, а также показателей в составе используемых критериев и целевых функций.

Вероятностные свойства видно в составе методов определения тех или иных данных при нахождении характеристик и элементов судна, в таком случае вероятностные свойства характеризуют применяемые методы, хотя сами характеристики и элементы в основной части предопределены теми или иными физическими предпосылками. Например, соотношения размерений как вид проектных элементов обусловлены соответствующими мореходными качествами и эксплуатационными требованиями, в частности, требования к остойчивости обычно оказывают влияние на отношение ширины создаваемого судна к его осадке ( $B/T$ ), условие удовлетворительной ходкости влияет на отношение длины судна к ширине ( $L/B$ ) и на величину коэффициента общей полноты  $\delta_w$ , условие непотопляемости с учетом предельных длин отсеков между непроницаемыми поперечными переборками, доходящими до главной палубы, влияет на выбор отношения высоты борта судна к осадке ( $H/T$ ) и т.д. Не смотря на то, что перечисленные и другие условия при нахождении проектных элементов судна в форме соотношений их размерений в основе имеют физическую природу, тем не менее при их практическом определении используются, также, данные аналогов и статистических наблюдений, построенных по данным этих аналогов.

Кроме вероятностных закономерностей в методах определения элементов, соотношения которых подчинены физическим условиям и закономерностям, взаимозависимость между характеристиками судна может сама по себе базироваться на вероятностных свойствах объекта, при этом речь не о применении тех или иных вероятностных оценок или наблюдений в составе методов. В качестве иллюстративного примера можно назвать уравнение баланса, устанавливающее зависимость между проектным дедвейтом судна  $DW$  (или его грузоподъемностью  $P_G$ ), с одной стороны, и водоизмещением в грузу  $D$ , с другой стороны. Соотношение между водоизмещением судна по грузовую марку и соответствующей проектному дедвейту суммой независимых составляющих нагрузки, заданных при проектировании в форме ограничений или варьируемых в процессе проектирования для поиска их оптимальных значений, является результатом совокупного влияния на это соотношение многочисленных факторов – зависимых составляющих водоизмещения [5 и 6]. Это пропорциональное соотношение между водоизмещением по грузовую марку и проектным дедвейтом имеет вероятностный характер и не означает отдельное физическое свойство судна, такое, например, как то или иное мореходное качество, обычно применяемое для методов определения элементов судна. Т.е. в основе соотношения водоизмещения и его независимых составляющих лежит не физическое, а

вероятностное свойство судна как объекта при проектировании.

Свойства судна как объекта проектирования проявляются, в частности, в форме используемых критериев и целевых функций, в том числе проявляются вероятностные свойства, т.к. целевая функция означает последовательности зависимостей, которые устанавливают связь между данными (проектными ограничениями), искомыми характеристиками или элементами судна, а также параметрами (условно постоянными элементами судна), с одной стороны, и показателями, характеризующими экономическую эффективность судна, с другой стороны.

В совокупности показателей, которые входят в состав целевой функции и вероятностные свойства, которых, оказывают опосредованное влияние на вероятностные свойства самой функции наибольшее собственное влияние оказывают по-видимому те показатели, которые обобщаются в итоговой форме критерия оптимальности, т.к. нахождение целевой функции завершается определением этого критерия, а среди распространенных вариантов показателей в составе критерия выраженным вероятностными свойствами обладает показатель ставки дисконтирования  $i$ , характеризующий суммарные коммерческие риски, стоимость используемого капитала и фактор баланса при сопоставлении экономических потоков и единовременных инвестиционных показателей.

Примерами влияния вероятностного показателя дисконтирования на итоговую величину целевой функции могут служить критерии приведенных затрат  $PW$ , удельных приведенных затрат ( $PW/Q$ ), стоимостного вклада морских ресурсов ( $NPV$  и  $NPI$ ) и др., определяются в зависимости от показателя эффекта  $Q$ , совокупного годового дохода  $I$  и годовых эксплуатационных расходов  $C$ , от инвестиций (стоимости замещения судна  $RC$  и оборотных средств  $WA$ ), а также от вероятностного показателя ставки дисконтирования  $i$

$$PW = C + (RC + WA) \times i \quad (1)$$

$$PW/Q = (C + (RC + WA) \times i)/Q \quad (2)$$

$$NPI = NPV/((I/i)/(1+i)), \quad (3)$$

$$\text{или } NPI = 1 - (C/i + RC + WA) \times i \times (1+i)/I. \quad (4)$$

Показатели в составе критерия удельных приведенных затрат ( $I$ ,  $C$ ,  $RC$ ,  $WA$  и  $Q$ ) являются функциями от исходных данных (проектных ограничений), от искомых проектных характеристик и элементов судна, а также от параметров – элементов судна, которые на начальных стадиях проектирования можно считать условно постоянными.

Помимо вероятностного показателя ставки дисконтирования  $i$  в рассмотренных формулах критериев (1–4) опосредованное влияние на вероятностные свойства этих критериев оказывают также другие показатели ( $I$ ,  $C$ ,  $RC$ ,  $WA$  и  $Q$ ), однако они, в свою очередь, опосредованно показывают вероятностные свойства исходных данных (проектных ограничений), искомых проектных характеристик и элементов судна, а также

параметров, от которых эти показатели ( $I$ ,  $C$ ,  $RC$ ,  $WA$  и  $Q$ ) зависят. Поэтому влияние указанных показателей дохода, затрат, инвестиций и эффекта на вероятностные свойства целевой функции «размыто» и не является целостным в той мере, как на вероятностные свойства целевой функции влияет показатель ставки дисконтирования, используемый для обобщения показателей дохода, затрат, инвестиций и эффекта в форме критерии эффективности и оптимальности (1–4). По рассмотренной причине в качестве фактора вероятностных свойств целевых функций ниже рассматривается показатель суммарного риска (ставки дисконтирования  $i$ ).

#### **Вероятностные свойства распределения показателя дисконтирования в составе критериев и целевых функций**

Для исследования вероятностных свойств, используемых при определении оптимальных характеристик и элементов судна, анализируются функция плотности вероятности и интегральная функция вероятности. В то же время в качестве общего фактора вероятностных свойств по выше рассмотренным причинам рассматривается широко применяемый в экономике показатель суммарного риска (ставки дисконтирования  $i$ ), служащий в составе критериев коэффициентом баланса инвестиций и денежных потоков, а также характеристикой стоимости капитала (инвестиций). Нужно установить соотношение между экономическим показателем суммарного риска и значениями математических вероятностных функций, проверить возможную взаимозаменяемость показателей риска и интегральной функции вероятности дефолта.

Интегральная функция вероятности экономического дефолта  $F_D$  в рамках распространенных допущений находится во взаимосвязи с суммарным коммерческим риском (ставкой дисконтирования  $i$ )

$$F_D = i/(1+i), \text{ т.е. } i = F_D/(1-F_D), \\ \text{или: } i \approx F_D \times e^{F_D}. \quad (5)$$

Зависимость ставки дисконтирования от показателя интегральной вероятности дефолта показанная формулами (5), говорит о том, что при малой ставке дисконтирования  $i$ , т.е. при относительно малых совокупных рисках дефолта, этот показатель и величина интегральной вероятности дефолта могут быть взаимозаменяемы:  $i \approx F_D$ , а при больших рисках имеется их растущее различие, при котором величина суммарных рисков  $i$  увеличивается быстрее и формально не имеет предела величины, в то время как величина интегральной вероятности дефолта  $F_D$  не превышает единицу (100 %). В то же время практически их значения ( $i$  и  $F_D$ ) редко превышают 20 %, а чаще составляют до 10 ... 15 %, и в характерном диапазоне они почти равны друг другу.

Для прикладных целей, в частности, для использования в составе критериев эффективности и целевых функций обычно используется показатель ставки дисконтирования  $i$  (суммарный коммерческих рисков и характеристики стоимости капитала), который можно найти или по данным аналогов или

методами «ипотечной группы», включая к сумме рисков инвестирования также безрисковые значения.

В том числе, может оцениваться стоимость собственного и заемного капитала и показатель экономического рычага. Результатом применения упомянутых прикладных методов служит наиболее вероятное значение, т.е. математическое ожидание показателя дисконтирования  $i$ .

Распределение плотности вероятности остальных значений показателя дисконтирования  $i_X$  можно найти по известному математическому закону Релея, учитывая формальные свойства этого показателя как вероятностной характеристики, в частности, учитывая его положительную величину и нулевую вероятность нулевого значения, снижение плотности вероятности значения показателя дисконтирования при его увеличении свыше наиболее вероятного значения (математического ожидания ставки дисконтирования  $i$ ) и пр.

Математическое распределение плотности вероятности значений показателя дисконтирования по закону Релея имеет вид

$$f(i_X) = (i_X/\sigma^2) \times e^{-i_X^2/(2\sigma^2)} \quad (6)$$

где  $i_X$  – вероятностное значение показателя дисконтирования, которому соответствует плотность вероятности  $f(i_X)$  и интегральная функция распределения вероятности  $F(i_X)$ ;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение показателя дисконтирования.

Плотность распределения  $f(i_X)$  вероятности по закону Релея значений показателя дисконтирования  $i_X$  в зависимости от математического ожидания  $i$  этого показателя показана на функциональной поверхности (Рис. 1).

Математическое ожидание  $M(i_X)$  показателя дисконтирования  $i_X$ , распределенного вероятностно, например, найденное методом «ипотечной группы» как сумма рисков или определенное по аналогам, а также связанное с математическим ожиданием значение дисперсии величины, распределенной по закону Релея равны

$$M(i_X) = i \text{ и } \sigma = 2 \times i / \sqrt{2 \times \pi}. \quad (7)$$

Значение интегральной вероятности  $F_i(i_X)$  – функционала от плотности распределения вероятности  $f_i(i_X)$ , искомое интегрированием равно

$$F_i(i_X) = \int_0^{i_X} f_i(i_X) d(i_X) = \\ = \int_0^{i_X} (i_X/\sigma^2) \times e^{-i_X^2/(2\sigma^2)} d(i_X), \quad (8)$$

Интегральная функция распределения вероятности  $F_i(i_X)$  показателя дисконтирования  $i_X$  по закону Релея (Рис. 2) определяется как

$$F_i(i_X) = 1 - e^{-i_X^2/(2\sigma^2)} \quad (9)$$

### Вероятностные значения критериев в зависимости от размера транспортного судна

При условии строгой монотонности (производная отличается от нуля и не меняет знак) плотность распределения вероятности  $f_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  удельных приведенных затрат, находящихся в монотонной зависимости от вероятностного показателя дисконтирования  $i_X$ , зная вероятностное распределение  $f_i(i((PW/Q)_X))$  показателя дисконтирования  $i((PW/Q)_X)$  (с учетом

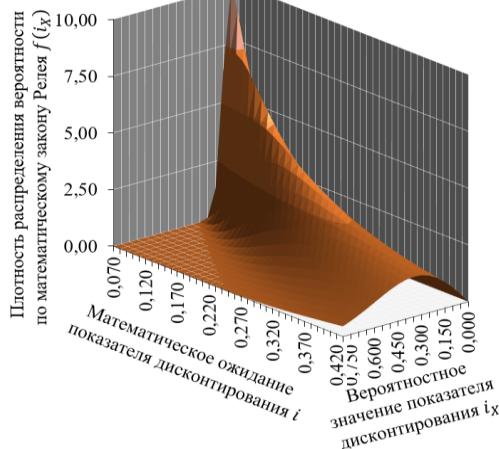


Рис. 1. Плотность распределения  $f(i_X)$  вероятности по закону Релея значений показателя дисконтирования  $i_X$  в зависимости от математического ожидания  $i$  этого показателя

Используя зависимость критерия приведенных затрат от показателя дисконтирования:

$$PW(i)/Q = (C + (RC + WA) \times i)/Q, \quad (11)$$

определяется обратная функциональная зависимость, необходимая для нахождения плотности распределения вероятности:

$$i(PW/Q) = ((PW/Q) \times Q - C)/(RC + WA), \quad (12)$$

$$\text{и ее производную } i'(PW/Q) = Q/(RC + WA)$$

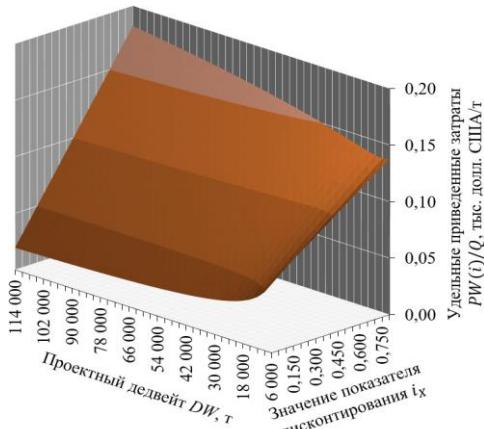


Рис. 3. Зависимость показателя удельных приведенных затрат  $PW(i)/Q$  от величины вероятностного показателя дисконтирования  $i_X$  и от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ )

математической формы Релея закона вероятностного распределения показателя дисконтирования), показатель плотности вероятности критерия удельных приведенных затрат, находящегося в зависимости от вероятностного показателя дисконтирования, можно найти по известной формуле

$$f_{PW/Q}((PW/Q)_X) = |i'((PW/Q)_X)| \times f_i(i((PW/Q)_X)) \quad (10)$$

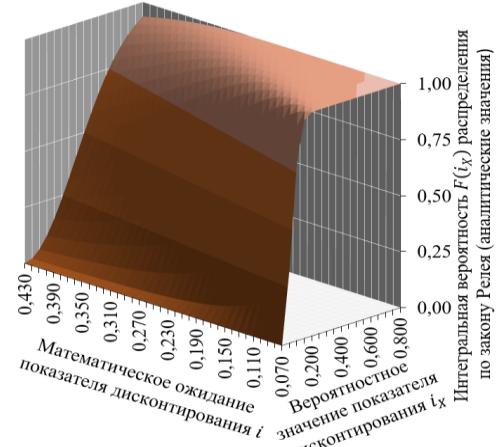


Рис. 2. Интегральная функция вероятности  $F_i(i_X)$  распределения по закону Релея показателей дисконтирования  $i_X$  в зависимости от математического ожидания  $i$  этого показателя, найденная по аналитической формуле

Зависимость удельных приведенных затрат:  $PW(i)/Q$  от показателя дисконтирования  $i$  и от размера (проектного дедвейта  $DW$ ) транспортного судна рассматриваемого типа (крановое сухогрузное контейнерное судно) показана на графической поверхности (Рис. 3). Обратная функциональная зависимость ставки дисконтирования  $i(PW/Q)$  от величины удельных приведенных затрат и от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ) показана на следующей графической поверхности (Рис. 4).

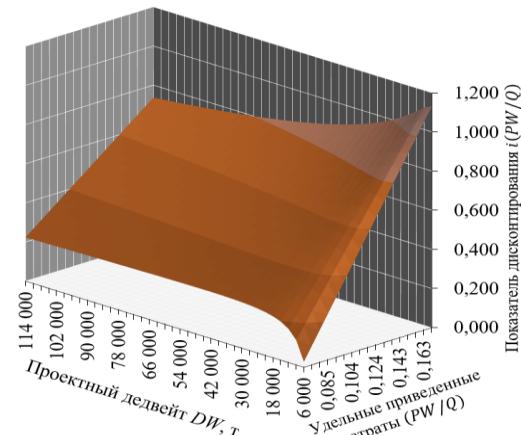


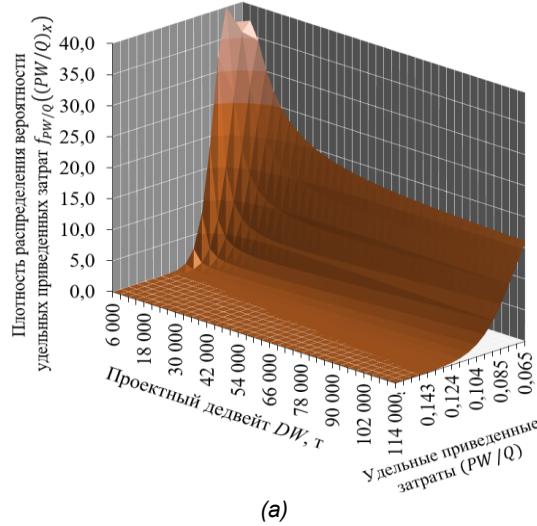
Рис. 4. Обратная функциональная зависимость ставки дисконтирования  $i(PW/Q)$  от величины удельных приведенных затрат и от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ )

Плотность распределения вероятности удельных приведенных затрат преобразованием закона Релея распределения показателя дисконтирования  $i$  имеет вид

$$f_{PW/Q}((PW/Q)_X) = |i'((PW/Q)_X)| \times (i(PW/Q)_X/\sigma^2) \times e^{-(i(PW/Q)_X)^2/(2 \times \sigma^2)} \quad (13)$$

$$\text{где } i((PW/Q)_X) = ((PW/Q)_X \times Q - C)/(RC + WA) \\ i'((PW/Q)_X) = Q/(RC + WA) \quad (14)$$

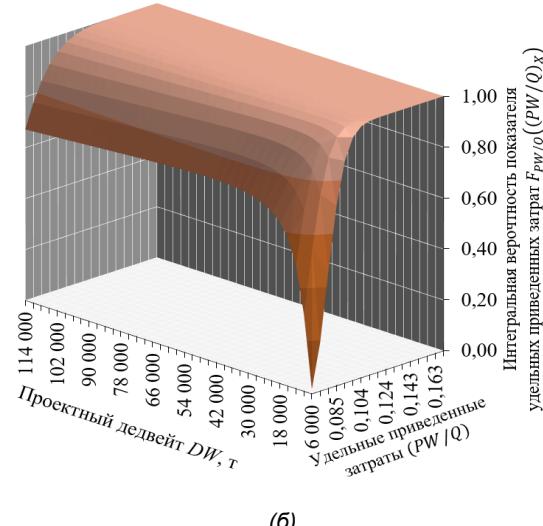
Условием применения формул (13 и 14) для нахождения функции плотности вероятности экономического критерия удельных приведенных затрат  $f_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  с учетом содержащегося в составе этого критерия вероятностного показателя суммарных рисков, распределенного по закону



(а)

Релея и при относительно небольших рисках взаимозаменяемого с показателем интегральной вероятности дефолта, служит строгая монотонность обратной функциональной зависимости ставки дисконтирования  $i(PW/Q)$  (или  $i((PW/Q)_X)$ ) от величины удельных приведенных затрат, т.е.:  $i'((PW/Q)_X) \neq 0$ , что видно по графику (Рис. 4).

Зависимость плотности распределения вероятности  $f_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  значений показателя удельных приведенных затрат от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ) при условии наиболее вероятного значений показателя ставки дисконтирования, распределенного по закону Релея, равного:  $M(i_X) = i = 15\%$  показана на графике функциональной поверхности (Рис. 5 а).



(б)

Рис. 5. Плотность распределения  $f_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  вероятности по закону Релея значений показателя удельных приведенных затрат в зависимости от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ) для значения показателя ставки дисконтирования  $M(i_X) = i = 15\%$  (а), а также интегральная функция распределения вероятности удельных приведенных затрат  $F_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  (б)

Интегральная функция распределения вероятности показателя удельных приведенных затрат имеет вид

$$F_{PW/Q}((PW/Q)_X) = 1 - e^{-(i(PW/Q)_X)^2/(2 \times \sigma^2)}. \quad (15)$$

Интегральная функция распределения вероятности  $F_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  значений удельных приведенных затрат в зависимости от размера судна показана на функциональных поверхностях (Рис. 5 б) и характеризует вероятность того, что удельные приведенные затраты не больше  $(PW/Q)_X$  для соответствующих значений размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ).

Зависимость критерия в форме вклада морских ресурсов  $NPI(i)$  от показателя дисконтирования  $i$  показана формулой (4), а также представлена на функциональной поверхности (Рис. 6). Обратная зависимость показателя дисконтирования имеет вид

$$i(NPI) = (-RC - WA - C)/I + \\ ((RC + WA + C)/I)^2 - 4 \times ((RC + WA)/I) \times$$

$$\times (C/I + NPI - 1)^{1/2}/(2 \times ((RC + WA)/I)) \quad (16)$$

Обратная функция ставки дисконтирования  $i(NPI)$  от показателя экономического вклада в расчете на единицу морских ресурсов, которая является строго монотонной по отношению к вероятностному показателю дисконтирования, показана на следующей графической поверхности (Рис. 7) в зависимости от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ). Указанная обратная функция является строго монотонной по отношению к показателю экономического вклада  $i(NPI)$  в расчете на единицу морских ресурсов.

Используемая при нахождении плотности вероятности обратная функция ставки дисконтирования  $i(NPI)$  от показателя экономического вклада в расчете на единицу морских ресурсов имеет вид

$$i'(NPI) = -1/(((RC + WA + C)/I)^2 - 4 \times (RC + WA) \times \\ \times (C/I + NPI - 1)/I)^{1/2}, \quad (17)$$

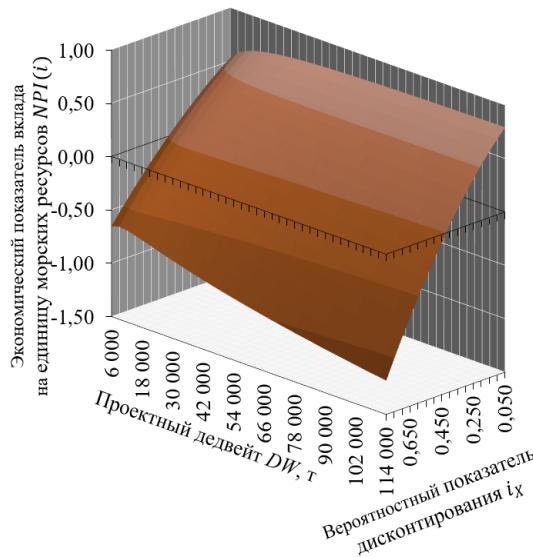


Рис. 6. Зависимость показателя экономического вклада морских ресурсов  $NPI(i)$  от величины вероятностного показателя дисконтирования  $i_X$  и от размера судна (проектного дедвейта  $DW$ )

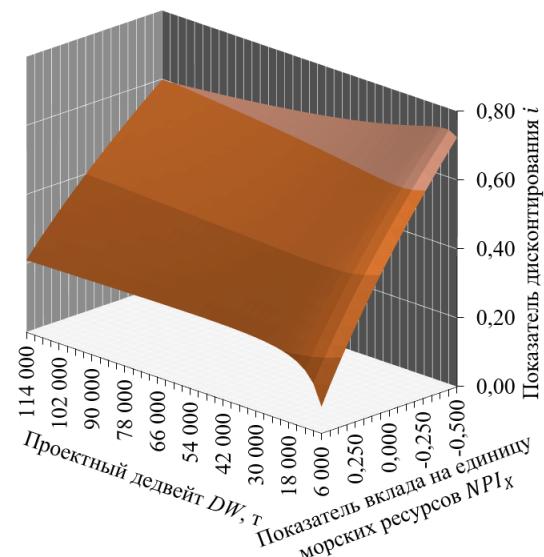


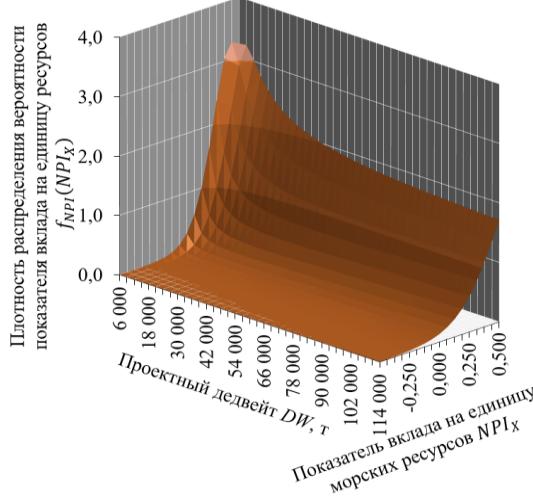
Рис. 7. Обратная функциональная зависимость ставки дисконтирования  $i(NPI)$  от показателя экономического вклада в расчете на единицу морских ресурсов от размера судна (проектного дедвейта  $DW$ )

Соответственно плотность вероятности вклада в расчете на единицу морских ресурсов  $f_{NPI}(NPI_X)$  при вероятностном распределении показателя дисконтирования по математическому закону Релея определяется как

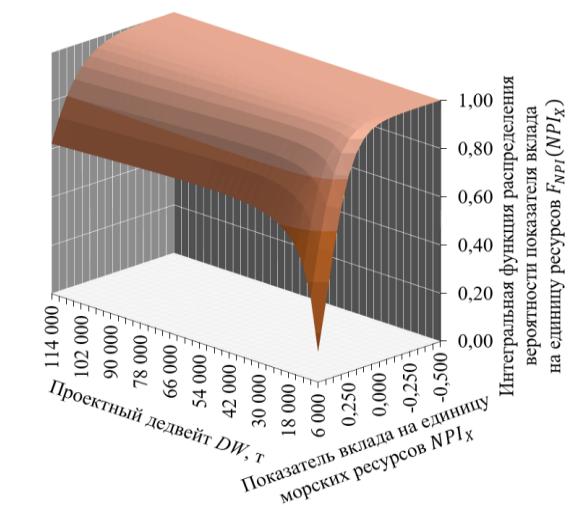
$$f_{NPI}(NPI_X) = |i'(NPI_X)| \times f_i(i(NPI_X)) \quad (18)$$

и равна

$$f_{NPI}(NPI_X) = |i'(NPI_X)| \times (i(NPI_X)/\sigma^2) \times e^{-(i(NPI_X))^2/(2\sigma^2)} \quad (19)$$



(а)



(б)

Рис. 8. Плотность распределения вероятности  $f_{NPI}(NPI_X)$  по закону Релея значений показателя вклада в расчете на единицу морских ресурсов в зависимости от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ) для значения показателя ставки дисконтирования  $M(i_X) = i = 15\%$  (а), а также интегральная функция распределения вероятности  $F_{NPI}(NPI_X)$  значений показателя вклада в расчете на единицу морских ресурсов (б)

Интегральная функция распределения вероятности показателя в форме вклада морских

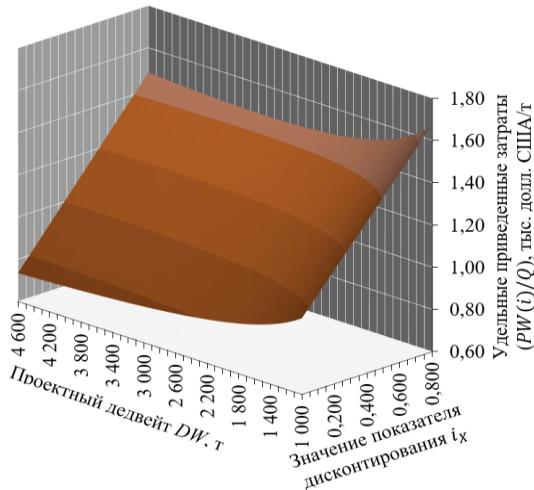
ресурсов  $F_{NPI}(NPI_X)$  преобразованием закона Релея распределения показателя дисконтирования,

показывает вероятность того, что вклад морских ресурсов в расчете на единицу не ниже, чем  $NPI_X$ . Интегральная функция распределения вероятности показателя в форме вклада морских ресурсов  $F_{NPI}(NPI_X)$  равна

$$F_{NPI}(NPI_X) = 1 - e^{-(i(NPI_X))^2/(2 \times \sigma^2)} \quad (20)$$

#### **Вероятностные значения критериев в зависимости от размера морского стального добывающе–перерабатывающего промыслового судна**

Используя зависимость критерия приведенных затрат от показателя дисконтирования (2), используя также обратную функциональную зависимость (12) и ее производную, а также функцию плотности вероятности распределения используемого в качестве критерия показателя ставки дисконтирования  $i$  по закону Релея (6), плотность



*Рис. 9. Зависимость показателя удельных приведенных затрат  $PW(i)/Q$  от величины вероятностного показателя дисконтирования  $i_X$  и от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ )*

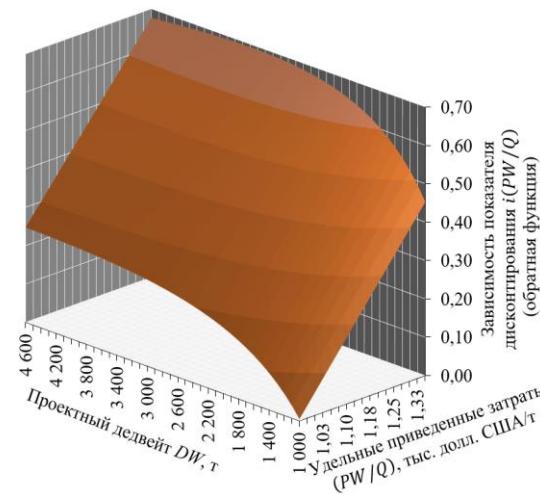
Полученные графики зависимости плотности распределения вероятности  $f_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  значений показателя удельных приведенных затрат от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ) при условии наиболее вероятных значений показателя ставки дисконтирования, определенного по закону Релея, показаны на функциональных поверхностях (Рис. 11 а). Интегральная функция распределения вероятности удельных приведенных затрат  $F_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  показана в форме графических поверхностей (Рис. 11 б).

Зависимость критерия в форме вклада морских ресурсов  $NPI(i)$  от показателя дисконтирования  $i$  показана формулой (4), а также представлена на функциональной поверхности для морского стального промыслового добывающе–перерабатывающего судна (Рис. 12).

Обратная зависимость (16) ставки дисконтирования  $i(NPI)$  от показателя экономического вклада в расчете на единицу морских ресурсов, которая является строго монотонной по

распределения вероятности удельных приведенных затрат преобразованием закона Релея распределения показателя дисконтирования  $i$  определяется по формулам (13 и 14). При этом для морского стального добывающе–перерабатывающего промыслового судна используемые для преобразования функции плотности вероятности показателя дисконтирования  $i$  в функцию плотности вероятности показателя удельных приведенных затрат  $f_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  по формуле (10) зависимости удельных приведенных затрат:  $PW(i)/Q$  от показателя дисконтирования  $i$  и от размера (проектного дедвейта  $DW$ ) промыслового судна показана на графической поверхности (Рис. 9).

Обратная функциональная зависимость ставки дисконтирования  $i(PW/Q)$  от величины удельных приведенных затрат и от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ) показана на следующей графической поверхности (Рис. 10).



*Рис. 10. Обратная функциональная зависимость ставки дисконтирования  $i(PW/Q)$  от величины удельных приведенных затрат и от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ )*

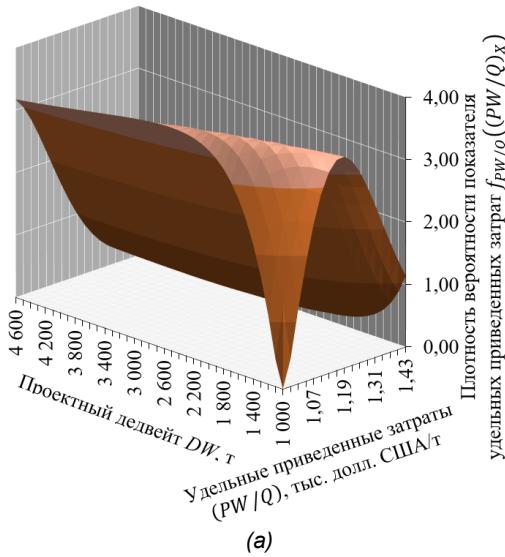
отношению к вероятностному показателю дисконтирования, показана на следующей графической поверхности (Рис. 13) в зависимости от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ).

Используя зависимость критерия вклада морских ресурсов в расчете на единицу их осваиваемого количества от показателя дисконтирования (4), используя, также, обратную функциональную зависимость (16) и ее производную, а также функцию плотности вероятности распределения используемого в качестве критерия показателя ставки дисконтирования  $i$  по закону Релея (6), плотность распределения вероятности показателя вклада морских ресурсов в расчете на единицу их осваиваемого количества  $f_{NPI}(NPI_X)$  преобразованием закона Релея определяется по формулам (18 и 19).

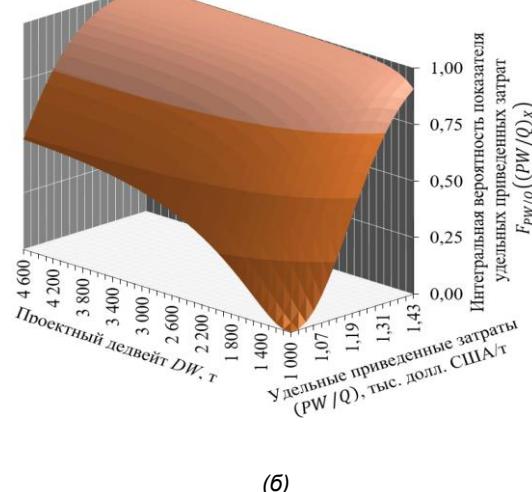
При этом для морского стального добывающе–перерабатывающего промыслового судна для преобразования функции плотности вероятности показателя дисконтирования  $i$  в функцию плотности

вероятности показателя вклада морских ресурсов в расчете на единицу их осваиваемого количества  $f_{NPI}(NPI_X)$  по формуле (10) используются зависимости: критерия в форме вклада морских ресурсов  $NPI(i)$  в расчете на единицу их осваиваемого количества от показателя

дисконтирования  $i$  (Рис. 12) и обратная функциональная зависимость  $i(NPI)$  от величины показателя оценки ресурсов и от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ , Рис. 13).



(а)



(б)

Рис. 11. Плотность распределения  $f_{PW/Q}((PW/Q)_X)$  вероятности значений показателя удельных приведенных затрат в зависимости от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ), для значения показателя ставки дисконтирования  $M(i_X) = i = 20\%$  (а), а также интегральная функция (б) распределения вероятности удельных приведенных затрат  $F_{PW/Q}((PW/Q)_X)$

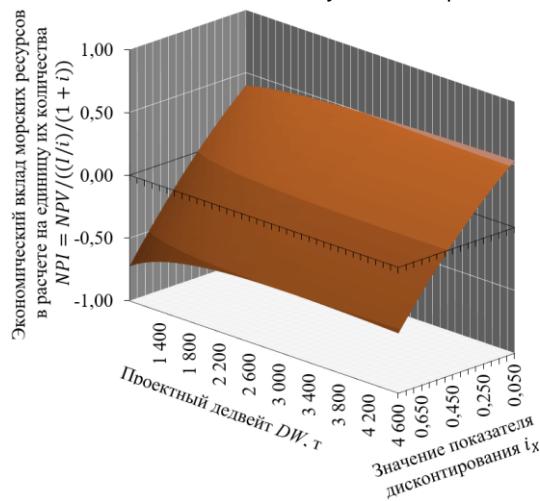


Рис. 12. Зависимость показателя экономического вклада морских ресурсов  $NPI(i)$  в расчете на единицу осваиваемых ресурсов от величины вероятностного показателя дисконтирования  $i_X$  и от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ )

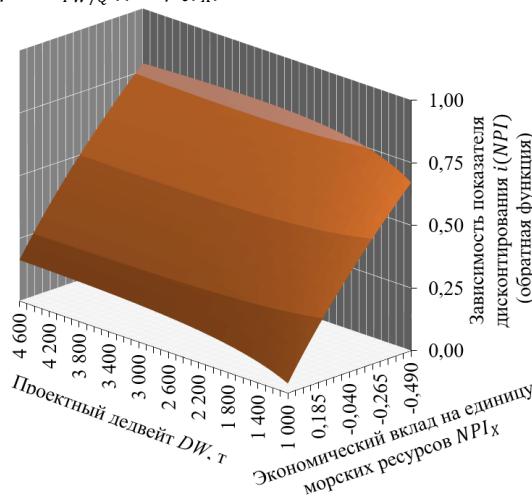


Рис. 13. Обратная функциональная зависимость ставки дисконтирования  $i(NPI)$  от показателя экономического вклада в расчете на единицу морских ресурсов от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ )

Плотность вероятности  $f_{NPI}(NPI_X)$  значений показателя вклада в расчете на единицу морских ресурсов в зависимости от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ) и интегральная функция вероятности  $F_{NPI}(NPI_X)$  вклада в расчете на единицу морских ресурсов при математическом ожидании показателя дисконтирования, распределенном вероятностно по математическому закону Релея показаны на графических функциональных поверхностях (Рис. 14

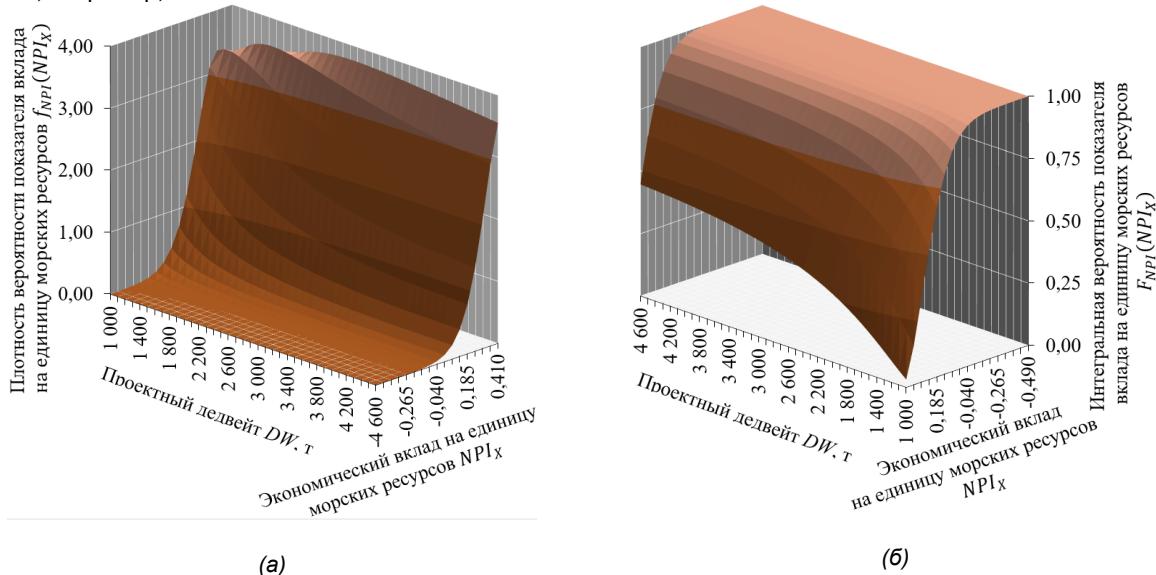
а и б) для морского стального промыслового добывающе–перерабатывающего судна.

### Заключение

Экономические показатели и критерии оптимальности, определяемые с помощью целевых функций при нахождении характеристик на начальных стадиях проектирования судов, отражают как влияние данных (проектных ограничений), а также варьируемых характеристик и элементов, так и параметров (принятых условно постоянных значений

части элементов судна). При этом вероятностные свойства указанных ограничений, характеристики и элементов, связанные как с методами их нахождения, так и с суммарным стохастическим (вероятностным) влиянием одних характеристик на другие, например, влиянием независимых слагаемых

нагрузки судна на суммарное водоизмещение в соответствие с уравнением баланса масс и др., обусловливают вероятностные свойства итоговых показателей, критериев и целевых функций в соответствии с алгоритмами их определения.



*Рис. 14. Плотность распределения вероятности  $f_{NPI}(NPI_X)$  по закону Релея значений показателя вклада в расчете на единицу морских ресурсов в зависимости от размера судна (характеристики проектного дедвейта  $DW$ ) для значения показателя ставки дисконтирования  $M(i_x) = i = 15\%$  (а), а также интегральная функция распределения вероятности  $F_{NPI}(NPI_X)$  значений показателя вклада в расчете на единицу морских ресурсов (б)*

Исследование вероятностных свойств критериев и целевых функций методически логично с учетом этих свойств тех величин, которые применяются при итоговом обобщении показателей в составе критериев, например, с учетом вероятностных свойств показателя суммарных коммерческих рисков (ставки дисконтирования), который в то же время служит характеристикой сопоставимости денежных потоков и одноразовых инвестиций в формулах этих критериев, а также показывает стоимость капиталовложений. Влияние вероятностных свойств иных данных, входящих в целевые функции (проектных ограничений, варьируемых характеристик и элементов судна, условно постоянных элементов – параметров) на эти свойства критериев и целевых функций не носит столь явного характера, т.к. эти иные данные алгоритмически более удалены от итогового обобщения показателей в составе критериев, их влияние на вероятностные свойства критериев более обременено помехами.

Собственные вероятностные свойства показателя дисконтирования формально соответствуют известному в математике распределению плотности вероятности по закону Релея. Для нахождения распределения плотности

вероятности экономических критериев, применяемых в форме целевых функций при определении характеристик судов на начальных стадиях их проектирования, в зависимости от распределения плотности вероятности показателя дисконтирования используется математическая теорема в соответствии с которой плотность вероятности значения того или иного критерия зависит от формы обратной функции – зависимости показателя дисконтирования от этого критерия и от производной обратной функции при условии, что строго монотонна зависимость самого критерия от показателя дисконтирования, вероятностное распределение которого в рассматриваемой задаче дано в форме математического закона Релея.

На основе использования обратных функциональных зависимостей (показателя дисконтирования от критерия, в формулу которого он входит), являющихся строго монотонными, и их производных получены формы распределения вероятностных значений критериев удельных приведенных затрат, а также показателя вклада морских ресурсов в стоимость инвестиций при создании судна в расчете на единицу количества осваиваемых ресурсов.

## Литература

1. Войлошников М.В. Морские ресурсы и техника: эффективность, стоимость, оптимальность. Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2002. 586 с.
2. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т. 1: Описание системы «Корабль». Т. 2: Анализ синтез системы «Корабль». СПб. : Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014.
3. Канторович Л.М. Экономический расчет наилучшего использования ресурсов. М. : Изд-во АН СССР, 1959.
4. Огай С.А., Войлошников М.В. Оптимизация проектных характеристик судна в составе комплекса судоходной

- компании // Морские интеллектуальные технологии: науч. журн. 2011. № 4 (14).
5. Огай С.А., Войлошников М.В. Проектная нагрузка и водоизмещение многоцелевого судна ледового плавания // Морские интеллектуальные технологии: науч. журн. 2015. № 3 (29), т. 1. С. 12–27.
  6. Огай С.А. Модели определения характеристики при создании многоцелевых судов для арктических и замерзающих морей: монография. Владивосток: Дальнаука, 2018. 316 с.
  7. Огай С.А. Целевая функция для оптимизации проектных характеристик многоцелевого судна ледового плавания // Морские интеллектуальные технологии: науч. журн. 2016. № 3 (33), т. 1. С. 15–24.
  8. Пашин В.М. Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983.
  9. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Systemic approach of design characteristics determining of multifunctional ships for frozen seas: textbook. – Vladivostok: Publishing house of State Maritime University named Admiral G.I. Nevelskoi, 2021. – 375 p.

#### References

1. Vojloshnikov M.V. Morskie resursy i tekhnika: effektivnost', stoimost', optimal'nost' [The ocean resources and engineering: the efficiency, the value and the optimality]. Vladivostok : Izd-vo DVGTU, 2002. 586 s.
2. Gajkovich, A.I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchih korablej i sudov [The designing theory of the displaces combat vessels and merchant ships]: v 2 t. T. 1: Opisanie sistemy «Korabl». T. 2: Analizi sintez sistemy «Korabl». SPb. : Izd-vo NIC MORINTEKH, 2014.
3. Kantorovich L.M. Ekonomicheskij raschet nailuchshego ispol'zovaniya resursov [The economic determining of the best use of the resources]. M. : Izd-vo AN SSSR, 1959.
4. Ogaj S.A., Vojloshnikov M.V. Optimizaciya proektnyh harakteristik sudna v sostave kompleksa sudohodnoj kompanii [Optimization of ship design characteristics in the composition of navigation company complex] // Morskie intellektual'nye tekhnologii: nauch. zhurn. 2011. № 4 (14).
5. Ogaj S.A., Vojloshnikov M.V. Proektnaya nagruzka i vodoizmeshchenie mnogocelevogo sudna ledovogo plavaniya [The design load and the displacement of multipurpose ship for ice navigation] // Morskie intellektual'nye tekhnologii: nauch. zhurn. 2015. № 3 (29), t. 1. S. 12–27.
6. Ogaj S.A. Modeli opredeleniya harakteristik pri sozdaniyu mnogocelevyh sudov dlya arkticheskikh i za-merzayushchih morej [The models of determining of characteristics of multifunctional ships for Arctic and frozen seas]: monografiya. Vladivostok : Dal'nauka, 2018. 316 s.
7. Ogaj S.A. Celyeaya funkciya dlya optimizacii proektnyh harakteristik mnogocelevogo sudna ledovogo plavaniya [The objective function for optimization of design characteristics of multipurpose ice-navigation ship] // Morskie intellektual'nye tekhnologii: nauch. zhurn. 2016. № 3 (33), t. 1. S. 15–24.
8. Pashin V.M. Optimizaciya sudov [Design optimization of ships]. L. : Sudostroenie, 1983.
9. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Systemic approach of design characteristics determining of multifunctional ships for frozen seas: textbook. – Vladivostok: Publishing house of State Maritime University named Admiral G.I. Nevelskoi, 2021. – 375 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, профессор Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50-а, тел.: +7 (423) 241–4968; e-mail: ogay@msun.ru

**Михаил Владиленович Войлошников**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50-а, тел.: +7–914–705–6029, e-mail: michael.vladlen@gmail.com

**Алексей Сергеевич Огай**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50-а, тел.: +7 (423) 256–5307; e-mail: ogay\_a@msun.ru

**Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Professor of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50-a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russian Federation; tel.: (423) 241–4968; e-mail: ogay@msun.ru

**Michael V. Voyloshnikov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Chief research scientist of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50-a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russian Federation; tel.: +7–914–705–6029, e-mail: michael.vladlen@gmail.com

**Alexey S. Ogai**, Cand. Sci. Eng), Associate professor, Director of Department of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50-a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russian Federation; tel.: +7 (423) 256–5307, e-mail: ogay\_a@msun.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.02.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.06.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 02.06.2022.

## ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

**Научная статья**

**УДК 624.147**

**DOI:** <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.003>

### **Возможности увеличения прочности ледяного покрова путем его армирования**

**В.М. Козин<sup>1</sup>, kozinvictor@rambler.ru**

<sup>1</sup>Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

**Аннотация.** В работе отмечается, что слабая развитость дорожной сети северных территорий нашей страны приводит к необходимости в зимний период для доставки грузов использовать ледяной покров в качестве: автозимников; ледяных переправ; грузонесущих платформ; а иногда и взлетно-посадочных полос для самолетов. На основании приведенных в работе опытов негативного использования ледяного покрова для этих целей и обзора известных способов упрочнения льда показана актуальность рассмотренной в работе задачи - увеличения прочности ледяного покрова путем его армирования стальной арматурой и перспективность такой технологии. Приведены результаты экспериментов, выполненных на специально изготовленном испытательном стенде, по нагружению поперечными нагрузками ледяных балок с различными степенями их армирования стальной арматурой. На их основании показана возможность существенного увеличения прочности ледяного покрова путем такого армирования по сравнению с известными технологиями. Сделано заключение, что полученная на основании этих исследований зависимость разрушающей нагрузки от степени армирования льда указывает на целесообразность дальнейших исследований в этом направлении. В работе также приведены разработанные автором на уровне изобретений способы армирования ледяного покрова. Отмечается их простота и экологичность благодаря несложности внедрения в лед и извлечению стальной арматуры из ледяного покрова (после окончания срока эксплуатации ледяной переправы) путем ее нагрева электрическим током.

**Ключевые слова:** ледяные балки; армирование стальной арматурой; изготовленный стенд, поперечные нагрузки, чистый изгиб, повышение прочности.

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

**Для цитирования:** Козин В.М. Возможности увеличения прочности ледяного покрова путем его армирования. 2022. № 2 часть 1. С. 29—34.

**Original article**

**DOI:** <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.003>

### **The possibility of increasing the strength of the ice cover by reinforcing it**

**Viktor M. Kozin<sup>1</sup>, kozinvictor@rambler.ru**

<sup>1</sup>Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

**Annotation.** The paper notes that the weak development of the road network of the northern territories of our country leads to the need in winter to use the ice cover for the delivery of goods as: winter trucks; ice crossings; cargo-carrying platforms; and sometimes runways for aircraft. Based on the experiments of the negative use of the ice cover for these purposes and a review of the known methods of ice hardening, the relevance of the problem considered in the work - increasing the strength of the ice cover by reinforcing it with steel reinforcement and the prospects of such a technology are shown. The results of experiments performed on a specially manufactured test bench on loading ice beams with various degrees of reinforcement with steel reinforcement with transverse loads are presented. On their basis, the possibility of a significant increase in the strength of the ice cover by such reinforcement in comparison with known technologies is shown.

**Key words:** ice beams; their reinforcement with steel reinforcement; manufactured stand, transverse loads, net bending, strength increase.

**Financing:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Machine Science and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Kozin V.M. The possibility of increasing the strength of the ice cover by reinforcing it. 2022. № 2 part 1. P. 29—34.

## Введение

Большая часть Дальнего Востока и Сибири являются малоосвоенными или труднодоступными территориями, где транспортное сообщение возможно в летний период по воде, а в зимний - по зимникам. Основными трудностями при сооружении зимников являются устройства переходов через водные преграды. Длительный период ледостава - основной фактор, определяющий сроки начала их эксплуатации. Его продолжительность определяется временем естественного нарастания толщины льда до необходимой для обеспечения требуемой несущей способности ледяного покрова. Таким образом, слабая развитость дорожной сети северных территорий нашей страны приводит к необходимости в зимний период для доставки грузов использовать ледяной покров в качестве: автотрасс; ледяных переправ; грузонесущих платформ; а иногда и взлетно-посадочных полос для самолетов. Так, по данным МЧС ежегодно в России официально действуют от 400 до 500 ледяных переправ, протяженность которых составляет от десятков метров до десятков километров (оз. Байкал, р. Енисей и др.). Только на территории Ямало-Ненецкого автономного округа зимой вводится в эксплуатацию более 60 ледяных переправ протяженностью более 100 км [1]. В большинстве эти временные дороги являются единственным возможным средством пересечения многочисленных рек, озер, болот, затопленных участков и др. водных препятствий. По данным Комитета совета Федерации по делам Севера и малочисленных народов более 70% населения не имеют возможности круглогодичного выхода на дороги с твердым покрытием, хотя примеры использования естественного ледяного покрова в качестве ледяных переправ через реки и водохранилища в условиях устойчивых низких температур известны очень давно. В силу климатических условий в нашей стране ледяные переправы используются с 90-х годов XIX столетия. Однако, изучение работы ледяного покрова под нагрузкой и применение общих принципов строительной механики к расчету его несущей способности начаты сравнительно недавно.

Особенность эксплуатации ледяных переправ характеризуется малыми интенсивностью и скоростью движения транспортных средств при одновременной необходимости обеспечения их значительной грузоподъемности. Например, для безопасного пропуска большегрузных транспортных средств (общей массой 30 - 40 т и более) толщина прочного ледяного покрова должна составлять не менее 70 - 90 см [1].

### 1. Негативный опыт эксплуатации ледяного покрова

Из-за нарушений требований техники безопасности эксплуатации ледяных переправ, а также переоценки их прочности ежегодно возникают аварийные ситуации при движении автомобилей по льду (рис. 1) и, зачастую, с человеческими жертвами.



Рис. 1. Случай провала автомобиля под лед

В последние годы возрос интерес к освоению полярных районов с целью разработки нефтегазоносных месторождений. В связи с этим возникает необходимость создания воздушной навигации в эти труднодоступные районы. Строительство аэродромов в данных местностях весьма трудоемко и требует значительных экономических затрат. Использование для этих целей ледяного покрова позволяет сократить их объемы. При этом возникает проблема определения толщины ледяного покрова, достаточный для безопасной посадки самолетов на ледяной покров. На рис. 2 приведены случаи неудачного использования ледяного покрова для этих целей. В подобных случаях становится актуальным решение задач по упрочнению льда.



б)



Рис. 2. Неудачная посадка самолетов на ледяной покров: а - разрушение льда под хвостовой частью самолета; б - разрушение льда под его фюзеляжем

Это особенно важно при движении нагрузки по льду со скоростями, приводящим к возникновению изгибно-гравитационного резонанса, т.к. в этих случаях несущая способность ледяного покрова резко снижается [2]. Из истории Великой Отечественной войны известно, что движение автомашин с такими скоростями по трассе "Дорога жизни" в дни блокады Ленинграда приводило к разрушению ледяного покрова и провалу машин под лед. При этом отмечалось, что нагрузка на лед от тяжело загруженных автомобилей, перевозящих в город продовольствие, не приводила к разрушению льда, а облегченные автомашины, вывозившие из города изголодавшихся ленинградцев и движущиеся с повышенными (ближними к резонансным) скоростями, проваливались под лед (рис. 3).



Рис. 3. Провал автомобиля под лед на трассе "Дорога жизни" (1942 г.)

## 2. Краткий обзор существующих способов упрочнения ледяного покрова

Традиционно прочность ледяного покрова увеличивают расчисткой его от снега, намораживанием дополнительных слоев льда сверху или снизу, вмораживанием в верхние слои льда настила в виде деревянных брусьев, бревен, веток, соломы, пластмассовых прутьев, стальных тросов, пульпы из газетной бумаги, листов пергамента и т.п. [3]. В последнее время стали появляться работы по армированию льда, в том числе и геосинтетическими материалами (рис. 4), при этом, как отмечалось авторами этих экспериментов, несущую способность ледяного покрова удавалось увеличить в среднем на 40% [1].

а)



б)



Рис. 4. Армирование ледяного покрова геосинтетическими материалами: а - укладка стеклосетки; б - заливка переправы водой

## 3. Выполненные эксперименты по армированию льда стальной арматурой

Известно [4], что лед в составе ледяного покрова не является прочным материалом. Так, при отсутствии упругого основания (воды) выпиленная из него консоль при длине равной 6-8 его толщинам разрушается под собственным весом. Таким образом, несущая способность сплошного ледяного покрова в большей степени определяется силами поддержания упругого основания. Поэтому одним из перспективных направлений наряду с разработкой новых технологий упрочнения льда как материала, например, путем его армирования, является поиск методов, способствующих даже при предельных нагрузках, т.е. вызывающих трещинообразование (разрушение) деформациях, сохранять несущую способность благодаря обеспечению сплошности ледяного покрова за счет более эффективного использования сил поддержания воды (сил плавучести или Архимедовых сил).

Общеизвестно, что для сохранения целостности и, за счет этого, увеличения прочности изделий из бетона, несущей способности жестких монолитных покрытий, например, автомобильных и аэродромных железобетонных полотен, и пр., используют прочную стальную арматуру. Поскольку аналогичные задачи возникают и при эксплуатации ледяного покрова, то были выполнены исследования по определению максимальных поперечных нагрузок, которые выдерживали образцы в виде ледяных балок, армированные стальной арматурой, до нарушения их сплошности, т.е. раскрытия трещин по всей их толщине.

С этой целью было проведено несколько серий экспериментов. Исследовалось нагружение ледяных балок размерами 150x20x20 см поперечными нагрузками в условиях чистого изгиба с различными вариантами их армирования. Для этого был спроектирован и изготовлен испытательный стенд с вручную нагружающим винтовым устройством усилием до 100 кН (рис. 5).



Рис. 5. Изготовленный испытательный стенд

Опытные образцы нагружались внешней нагрузкой с образованием зоны чистого изгиба, что позволяло определять деформированное состояние армированного льда на всех стадиях его нагружения изгибающим моментом. В опытах арматура представляла собой ряды продольных стальных стержней диаметром 3 мм, расположенных на расстоянии 3 см от растянутой и сжатой поверхностей (горизонтальных граней) балки и соединенных между собой поперечными связями в виде прямоугольных рамок на расстоянии друг от друга 15 см (рис. 6.7). Были испытаны образцы при степенях армирования: 0,03% (один продольный стержень); 0,06% (два стержня) и 0,09% (три стержня).

Изготовление армированных балок осуществлялось путем погружения арматуры в предварительно приготовленную ледянную балку за счет ее разогрева электрическим током (рис. 6), либо замораживанием залитой в опалубку воды с предварительно размещенной в ней арматурой (рис. 7).

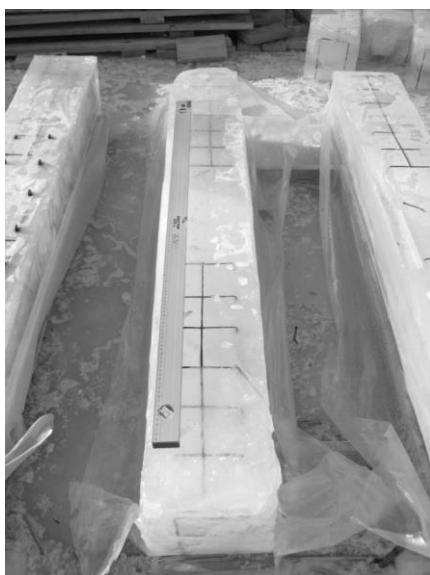


Рис. 6. Приготовленная армированная ледяная балка

В процессе экспериментов в сечениях зоны чистого изгиба измерялись прогибы балки и углы их поворотов. Одновременное использование измерительных приборов, расположенных симметрично относительно вертикальной оси испытательного стенда, позволяло повысить точность измерений, в том числе, определять и кривизну нейтральной оси балки в зоне чистого изгиба. Была проведена серия экспериментов с различными вариантами степени армирования льда (рис. 7).

а)



б)



Рис. 7. Опалубка (а) и приготовленные образцы балок (б)

Поперечная нагружающая нагрузка фиксировалась с помощью динамометра, а прогибы - с помощью датчиков перемещения. Максимальная нагрузка определялась на стадии нагружения образцов, соответствующей нарушению их сплошности (рис. 8).

а)



б)



Рис. 8. Различные стадии нагружения образца: а - начальная; б - полное разрушение (нарушение его сплошности)

#### 4. Результаты экспериментальных исследований

На основании выполненных экспериментов получены зависимости максимальных прогибов балок от величины поперечной нагрузки и степени их армирования (их типовая запись приведена на рис. 9).

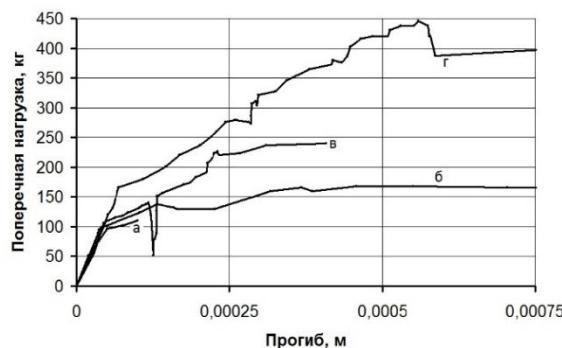


Рис. 9. Зависимость максимальных прогибов балки W от поперечной нагрузки Р при различных степенях армирования: а - неармированный лед; б, в, г - армированный лед (0,03%, 0,06%, 0,09% соответственно)

Эффективность армирования балок оценивалась на основании сравнения результатов экспериментов с данными по разрушению неармированных образцов. Результаты испытаний в среднем показали увеличение максимальной разрушающей нагрузки образцов (при одновременном нарушении их сплошности) второй, третьей и четвертой серии относительно образцов первой серии в зависимости от степени их армирования (рис. 9): б - в 1,4; в - в 2,0; г - в 3,8 раза соответственно. Для сравнения: при армировании ледяного покрова геосинтетическими материалами его несущая способность возрастила в среднем в 1,4 раза [1].

Полученные данные также позволяют определить значения модуля упругости льда в зависимости от степени его армирования, что необходимо для расчетов несущей способности армированного ледяного покрова.

#### 5. Разработанные способы увеличения прочности ледяных переправ путем армирования льда

Упрочнение ледяного покрова, в том числе и ледяных переправ, предложено осуществлять посредством вмораживания по обеим сторонам переправы и по всей ее длине стальных тросов. При этом на тросы предварительно устанавливают прочно с соединенные с ними шайбы. Перед их вмораживанием тросы растягивают, а после чего растягивающие усилия снимают, т.е. создают предварительно напряженное состояние. Для вмораживания тросов с шайбами в ледяной покров их разогревают до температуры выше температуры плавления льда посредством пропускания через них электрического тока. После их погружения в ледяной покров на глубину не меньше половины толщины льда подачу электрического тока прекращают. Подготовленную таким образом поверхность ледяной переправы подвергают воздействию низких атмосферных температур ( $t < 0^{\circ}\text{C}$ ) до полного замерзания воды в канавках, возникшей при плавлении льда [5].

Близким по существу к вышеприведенному является способ увеличения грузоподъемности ледяной переправы, заключающийся в следующем. По обеим сторонам переправы по всей ее длине укладывают предварительно растянутые стальные пружины. После их вмораживания растягивающие усилия снимают. Для погружения пружин в ледяной покров их разогревают до температуры выше температуры плавления льда посредством пропускания через них электрического тока. После их погружения в ледяной покров на глубину больше диаметра пружин подачу электрического тока прекращают. Подготовленную таким образом поверхность ледяной переправы подвергают воздействию низких атмосферных температур ( $t < 0^{\circ}\text{C}$ ) до полного замерзания воды в канавках, возникшей при плавлении льда [6].

С целью создания ледяной грузонесущей платформы с повышенной грузоподъемностью в ледяном покрове в одном направлении формируют сквозные канавки. После этого в них опускают стальные балки. Горизонтальная нейтральная ось их поперечного сечения должна совпадать с нейтральной осью площади поперечного сечения ледяной пластины, верхняя часть балок - возвышаться над ледяным покровом, а нижняя часть - выходить из-под льда в воду. После этого полученную конструкцию подвергают воздействию естественных низких температур ( $t < 0^{\circ}\text{C}$ ) в течение времени, необходимого для образования наростов подо льдом на нижних, выступающих из-под льда, частях балок. При достижении наростов необходимой толщины прочность ледяной платформы будет повышена, что обеспечит рост безопасности движения по ней транспорта и надежности складирования грузов [7].

#### Заключение и выводы

На основании обзора опыта использования несущей способности ледяного покрова при создании ледяных переправ, автозимников, взлетно-

посадочных полос, грузонесущих платформ и пр. показана актуальность решения задач по упрочнению ледяного покрова, а на основании проделанных экспериментов - целесообразность дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в области повышения несущей способности и прочности ледяного покрова путем его армирования стальной арматурой.

Это следует из следующего:

1. Показана возможность существенного увеличения прочности ледяного покрова путем его армирования стальной арматурой по сравнению с известными технологиями.

2. Полученная на основании экспериментальных исследований зависимость максимальной разрушающей нагрузки от степени армирования льда до нарушения сплошности его образцов

указывает на целесообразность дальнейших изучений в этом направлении.

3. Следует исследовать работоспособность предложенных технологий внедрения в ледяной покров армирующих элементов в реальных ледовых условиях.

4. Простота и экологичность предложенных способов, в отличие от известных решений, вытекают из простоты их осуществления благодаря возможности внедрения в лед и извлечению стальной арматуры из ледяного покрова (после окончания срока эксплуатации ледяной переправы) путем ее нагрева электрическим током.

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

### Литература

1. Якименко О.В. Обоснование конструктивно-технологических решений ледовых переправ, армированных геосинтетическими материалами. Дисс. канд. техн. наук. Омск. 2011 г., 218 с.
2. Козин В.М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Извобретения и эксперименты. М.: Изд-во «Академия Естествознания». 2007. – 355 с. ISBN 978-5-91327-017-7
3. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. Л.: Гидрометеоиздат. 1967. 467 с. ил.
4. Иванов К.Е., Песчанский И.С. Грузоподъемность ледяного покрова и устройство дорог на льду / Труды ААНИИ Главного управления Северного морского пути при Совете министров СССР. Изд-во Главсевморпути. М.-Л. 1949, т. 23. 183 с.
5. Пат № 2459900 С1 РФ. Способ создания ледяной переправы / Козин В.М. // МПК E01D 15/14 (2006.01). Опубл. 27.08.2012 Бюл. № 24.
6. Пат № 2482239 С2 РФ. Способ создания ледяной переправы / Козин В.М. // МПК E01D 15/14 (2006.01). Опубл. 20.05.2013 Бюл. № 14.
7. Пат № 2198355 С2 РФ. Способ создания ледяной грузонесущей платформы / Козин В.М. // МПК F25C 1/12 (2000.01) E01D 15/14 (2000.01). Опубл. 10.02.2003 Бюл. № 4.

### References

1. Yakimenko O.V. Substantiation of structural and technological solutions of ice crossings reinforced with geosynthetic materials. Diss. Candidate of Technical Sciences. Omsk. 2011, 218 p.
2. Kozin V.M. Resonant method of ice cover destruction. Inventions and experiments. M.: Publishing house "Academy of Natural Sciences". 2007- - 355 p. ISBN 978-5-91327-017-7
3. Peschansky I.S. Ice science and ice engineering. L.: Hydrometeoizdat. 1967. 467 p. il.
4. Ivanov K.E., Peschansky I.S. The carrying capacity of the ice cover and the construction of roads on ice / Proceedings of the AANIA of the Main Directorate of the Northern Sea Route under the Council of Ministers of the USSR. Publishing house Glavsevmorput. M.-L. 1949, vol. 23. 183 p .
5. Pat No. 2459900 C1 of the Russian Federation. The method of creating an ice crossing / Kozin V.M. // IPC E01D 15/14 (2006.01). Publ. 27.08.2012 Byul. No. 24.
6. Pat No. 2482239 C2 RF. The method of creating an ice crossing / Kozin V.M. // IPC E01D 15/14 (2006.01). Publ. 20.05.2013 Byul. No. 14.
7. Pat No. 2198355 C2 of the Russian Federation. The method of creating an ice cargo-carrying platform / Kozin V.M. // IPC F25C 1/12 (2000.01) E01D 15/14 (2000.01). Publ. 10.02.2003 Byul. No. 4.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**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. Металлургов 1, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.02.2022.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.03.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 04.04.2022.

**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

**Научная статья**

УДК 551.467 (46.071:656.6)

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.004>

## **Оценка вероятности встречи со льдом в Татарском проливе на маршруте Де-Кастри – кромка**

Д.В. Зарубина<sup>1</sup>, [dariadorofeyeva26@gmail.com](mailto:dariadorofeyeva26@gmail.com), В.М. Пищальник<sup>1,2</sup> [vpishchalinik@rambler.ru](mailto:vpishchalinik@rambler.ru)

В.А. Романюк<sup>3</sup>: [varomanyuk2020@gmail.com](mailto:varomanyuk2020@gmail.com)

<sup>1</sup>Сахалинский государственный университет, <sup>2</sup>ИМГиГ ДВО РАН, <sup>3</sup>СахалиНИПИ нефти и газа»

**Аннотация.** В статье выполнена оценка вероятности встречи со льдом судов, следующих из порта Де-Кастри в страны Юго-Восточной Азии по двум маршрутам, которые условно определены как Западный и Восточный. Статистические характеристики вероятности встречи со льдом рассчитаны на основе обработки данных спутниковых наблюдений за период стандартной климатической нормы 1991–2020 гг. Установлено, что при следовании судов по Западному маршруту протяженность пути с вероятностью встречи со льдом более 50% и наиболее сложными ледовыми условиями (сплошность 9–10 баллов, торосистость 2 балла, толщина льда до 50 см) в период максимального развития ледяного покрова (февраль–март) составляет ~390 морских миль, что на ~50 морских миль больше, чем при следовании судов по Восточному маршруту.

**Ключевые слова:** зимняя навигация, вероятность встречи со льдом, ледовые условия, Татарский пролив

**Для цитирования:** Зарубина Д.В., Пищальник В.М., Романюк В.А. Оценка вероятности встречи со льдом в Татарском проливе на маршруте Де-Кастри – кромка. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 35–41.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.004>

## **Probability estimation of ice encounter in the Tatar Strait on the route De-Kastri - the ice edge**

Daria V. Zarubina<sup>1</sup> [dariadorofeyeva26@gmail.com](mailto:dariadorofeyeva26@gmail.com), Vladimir M. Pishchalinik<sup>1,2</sup> [vpishchalinik@rambler.ru](mailto:vpishchalinik@rambler.ru), Valery A. Romanyuk<sup>3</sup> [varomanyuk2020@gmail.com](mailto:varomanyuk2020@gmail.com)

<sup>1</sup> Sakhalin State University, <sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS,

<sup>3</sup> SakhalinNIP oil and gas LLC, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

**Abstract.** In this report we estimate the probability of ice encounter for ships traveling from the port of De-Kastri to the countries of Southeast Asia along two routes. Those routes were identified as the Western route and the Eastern route. The statistical characteristics of ice encounter probability were calculated based on the processing of 30-year observation series during the period of the standard climatic normal of 1991–2020. As a result of data analysis, we established that during the period of ice extent maximum development, that is February and March, the length of Western route came to approximately 207 nautical miles. Not only that was 20 miles longer compared to the Eastern one, but the route also had some quite harsh characteristics. Those included not only ice encounter probability of more than 50%, but also some of the most challenging ice conditions, such as ice concentration of 9 to 10 points, hummocking of 2 points and ice thickness of up to 50 cm.

**Keywords:** winter navigation, probability of ice encounter, ice conditions, Tatar Strait.

**For citation:** Daria V. Zarubina, Vladimir M. Pishchalinik, Valery A. Romanyuk, Probability estimation of ice encounter in the Tatar Strait on the route De-Kastri - the ice edge. Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 35—41.

### **Введение**

В Татарском проливе, в отличие от морей Арктического бассейна отсутствует тренд уменьшения среднесезонной ледовитости за последние 30 лет, хотя повторяемость экстремально-сурьных типов зим уменьшилась на 6%, а продолжительность ледового сезона сократилась почти на месяц [Zarubina et al., 2021, Малинин и др., 2019]. По предварительным расчетам в период максимального развития ледяного покрова (февраль–март) местоположение кромки льда в Татарском проливе меняется незначительно. Также установлено, что объём льда в проливе уменьшился на ~30% и произошло это исключительно за счёт уменьшения его толщины [Pishchalinik et al., 2022].

С 2006 г. нефтеналивные танкера типа Афрамакс осуществляют регулярную транспортировку нефти

из крупнейшего порта Дальнего Востока Де-Кастри в страны Юго-Восточной Азии в объёме ~12 млн. т/год. Анализ онлайн-сервиса движения судов Marine Traffic Live Ships Map [<https://www.marinetraffic.com>] позволяет заключить, что зимнее плавание судов из порта Де-Кастри осуществляется преимущественно по двум маршрутам, которые условно можно назвать Западный и Восточный.

Западный маршрут проходит на удалении 5~25 миль от побережья материка. Общая протяженность его составляет 340 морских миль. Основанием для его выбора является использование для плавания квазистационарной полыни, заполненной ниласовыми и молодыми льдами в периоды активного воздействия зимнего муссона (ветра северо-западных направлений). Плавание по Восточному маршруту протяженностью 363 мили целесообразно осуществлять, когда Западный

маршрут закрывается (обычно в районе мыса Сюркум  $50^{\circ}05'45.75''\text{N}$ ,  $140^{\circ}41'09.25''\text{E}$ ) при доминировании ветров восточных направлений, результатом воздействия которых является формирование обширных зон разводий вдоль побережья Сахалина, что наряду с особенностями конфигурации кромки ледяного массива делает путь во льдах значительно короче.

Целью настоящей работы является оценка вероятности встречи со льдом и протяженности пути во льдах различной толщины при транспортировке нефти из порта Де-Кастри в страны Юго-Восточной Азии в зимний период.

Результаты работы существенно расширяют современные представления о ледовом режиме Татарского пролива и могут быть использованы как в практической деятельности при осуществлении судоходства в зимнее время, так и при разработке методик прогноза ледовых условий [Якунин и др., 2003; Плотников 2002, Шатилина и др., 2006].

## 1. Материалы и методы

Расчёт вероятности встречи со льдом и площади ледяного покрова выполнен за период стандартной климатической нормы с 1991 по 2020 гг. с помощью программного комплекса «ЛЕД» [Свидетельство ..., 2015] на основе данных наблюдений спутниковых микроволновых радиометров, которые публикует Japan Meteorological Agency (JMA) [<http://ds.data.jma.go.jp>].

Интегральная кривая аномалий ледовитости рассчитывалась путём последовательного алгебраического сложения данных значений аномалий.

Статистические характеристики вероятности встречи со льдом рассчитывались на основе обработки 30-летнего ряда наблюдений на 15 число каждого месяца в период с декабря по апрель по формуле:

$$V = N/n * 100\%, \quad (1)$$

где,  $N$  – число случаев с наличием льда на маршруте,  $n$  – количество наблюдений (30 лет).

Величина среднесезонного значения ледовитости рассчитывалась как средняя за пять зимних месяцев. Такой подход позволяет сглаживать ошибки вычисления среднего за счёт смещения времени наступления ледовых фаз.

Средневзвешенная толщина льда (далее толщина льда) в зонах различной вероятности встречи со льдом рассчитывалась ледовым экспертом при дешифрировании спутниковых снимков в видимом диапазоне на основе весовых соотношений толщин трёх доминирующих возрастных характеристик льда с учётом деформации ледяного покрова (Pishchalnik et al., 2022).

Для верификации и анализа расчётных данных дополнительно привлекался авторский архив спутниковых снимков ледяного покрова в видимом диапазоне, а также результаты анализа комплексных гидрометеорологических исследований, выполненных в разное время в Татарском проливе (Якунин, 2003, Лобанов и др., 2014).

## 2. Обсуждение результатов

### 2.1. Режимные характеристики

Среднесезонное значение ледовитости Татарского пролива в период с 1991 по 2020 гг. составило 29%, что соответствует площади ледяного покрова 30,9 тыс. км<sup>2</sup> (рисунок 1). Размах колебаний ледовитости достигал 24 %, что в 1,6 раза меньше аналогичной величины, рассчитанной в стандартный опорный период 1961-1990 гг. [Zarubina et al., 2021]. Наклон линейного тренда отсутствует. Максимум ледовитости (43%) зафиксирован в 2001 г., минимум (14%) – в 1991 г. Последняя величина соответствует абсолютному минимуму ледовитости в Татарском проливе за всю историю метеонаблюдений [Пищалярник, 2019].

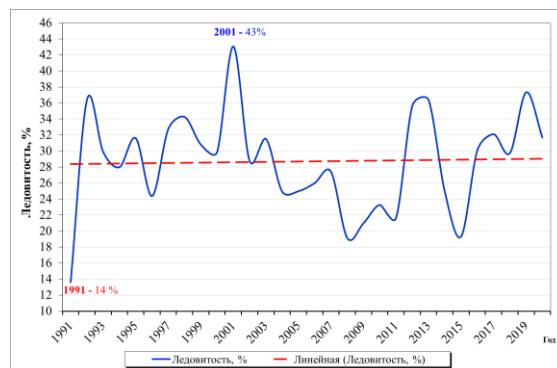


Рис. 1. Многолетняя изменчивость среднесезонной ледовитости Татарского пролива за период 1991 – 2020 гг.

Изменения многолетнего хода аномалий ледовитости представлены на интегральной кривой (рисунок 2), которая наглядно демонстрирует наличие коротких и продолжительных циклов во временном ходе параметра. Так, накопление положительных аномалий ледовитости происходило с 1991 по 2003 гг. (77% случаев), затем следует период преобладания отрицательных аномалий ледовитости до 2015 г., который вновь сменяется коротким периодом накопления положительных аномалий. Эти закономерности имеют обобщающий характер, причём последнее накопление (с 2016 г.) не корректно считать

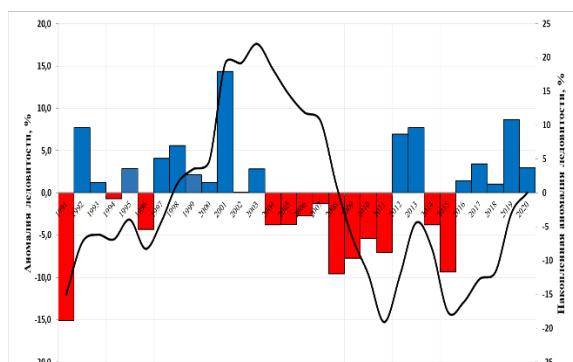


Рис. 2. Многолетняя изменчивость среднесезонных аномалий ледовитости и интегральная кривая аномалий ледовитости в Татарском проливе

достоверным, т.к. данный период приходится на конец кривой и точка перегиба выражена неявно.

Вместе с тем сам характер колебаний кривой подтверждает отсутствие тренда ледовитости.

В таблице 1 приведены расчётные данные дат наступления ледовых фаз в период стандартной климатической нормы 1991-2020 гг. Точность расчётов составляет  $+/-2,5$  сут. При анализе этих данных установлено, что на фазе ледообразования различия между средними датами составляют 2 сут., что находится ниже предела точности расчётов. Средняя дата первого появления льда приходится на 14 ноября (ранняя дата наблюдалась 5 ноября (1995, 2017 гг.), а поздняя – 25 ноября (1998, 2006 гг.).

Таблица 1

**Даты наступления ледовых фаз в Татарском проливе за период с 1991 по 2020 гг.**

<b>Средняя дата первого появления льда</b>	<b>14 ноя</b>
Ранняя дата первого появления льда	5 ноя
Поздняя дата первого появления льда	25 ноя
<b>Средняя дата устойчивого образования льда</b>	<b>16 ноя</b>
Ранняя дата устойчивого образования льда	5 ноя
Поздняя дата устойчивого образования льда	5 дек
<b>Средняя дата первого очищения ото льда</b>	<b>25 апр</b>
Ранняя дата первого очищения ото льда	5 апр
Поздняя дата первого очищения ото льда	20 мая
<b>Средняя дата окончательного очищения ото льда</b>	<b>26 апр</b>
Ранняя дата окончательного очищения ото льда	5 апр
Поздняя дата окончательного очищения ото льда	20 мая
<b>Продолжительность ледового сезона</b>	<b>163</b>

На фазе разрушения льда даты первого и окончательного очищения пролива практически совпадают (25 и 26 апреля соответственно). Совпадают и соответствующие даты наступления раннего и позднего очищения (пределы колебаний от 5 апреля до 20 мая). Это позволяет заключить, что образование и разрушение ледяного покрова в Татарском проливе в период стандартной климатической нормы 1991-2020 гг. происходило весьма активно и в сжатые сроки.

Средняя продолжительность ледового периода составила 163 сут. Самый короткий за последние 30 лет ледовый период зафиксирован зимой 1992/93 гг., когда его продолжительность сократилась до 141 сут. Самыми продолжительными были ледовые сезоны 1998/99 гг. и 2010/11 гг., когда лёд сохранялся на исследуемой акватории на протяжении 181 сут.

Внутрисезонный ход ледовитости в период стандартной климатической нормы 1991-2020 гг. для большей наглядности представлен тремя кривыми: первая отражает средние значения ледовитости, а две другие пределы колебаний, соответствующие абсолютному максимальным и минимальным значениям на каждую из дат наблюдений (рисунок 3). Максимум ледовитости наблюдается в феврале, хотя в отдельные годы возможно смещение на одну-две декады как на более ранние, так и на более

поздние сроки. В период максимального развития ледяного покрова (февраль-март) акватория пролива может быть заполнена льдами от 29 до 74% при среднем заполнении ~48%.

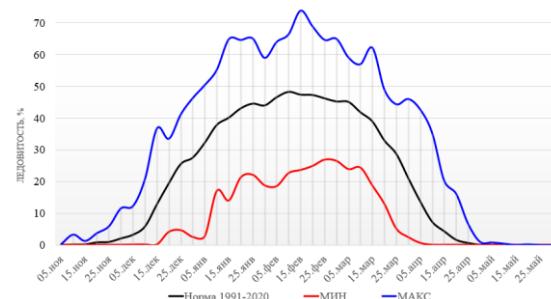


Рис. 3 – Внутрисезонный ход ледовитости в период стандартной климатической нормы 1991-2020 гг.

Отчётливо выраженные скачкообразные колебания ледовитости характерны на стадиях образования и максимального развития ледяного покрова. Обусловлены они прохождением через акваторию пролива глубоких барических образований, которые в силу морфометрических особенностей пролива вызывают резкую смену направления ветров, а, следовательно, и дрейфа льда, в результате чего происходит его сжатие и торошение, наиболее ярко выраженные вдоль отдельных участков побережья. На стадии разрушения ледяного покрова колебания его площади заметно сглажены, поскольку активность циклонической деятельности снижается в период смены муссона (Якунин, 2003, Zarubina et al., 2021).

## 2.2. Ледовые условия на маршрутах

В декабре, для судов ледового класса – ICE-1C, которые обеспечивают челночную перевозку нефти от Де-Кастри до портов Японии и Южной Кореи, ледяной покров Татарского пролива при толщине льда 7-14 см не представляет серьёзного препятствия (табл. 2). На обоих маршрутах вероятность встречи со льдом не превышает 70 % (рисунок 4). Преобладающими видами льда являются темный и светлый ниласы с включениями зон серого льда. В прикромочной зоне (вероятность встречи со льдом 20-30%) возможны включения серо-белого льда до 1-2 баллов. Однако, при прочих равных условиях протяженность пути во льдах на Восточном маршруте на 23 мили длиннее.

От декабря к январю толщина льда увеличивается примерно вдвое. Поэтому критерием при выборе маршрута будет являться протяженность пути в наиболее толстых льдах толщиной 20-30 см. На Западном маршруте участок встречи с такими льдами короче ~ на 50 миль. Подобные условия является отличительной особенностью января. В зонах от 10 до 80 % вероятности встречи со льдом преобладает молодой лёд (10-30 см). В зонах с 90 и 100 % вероятностью встречи со льдом, ледовые условия более сложные: отмечаются включения тонкого однолетнего льда до 1-2 баллов, торосистость которого достигает 1-2 балла, а толщина льда увеличивается до 28-30 см (табл. 2).

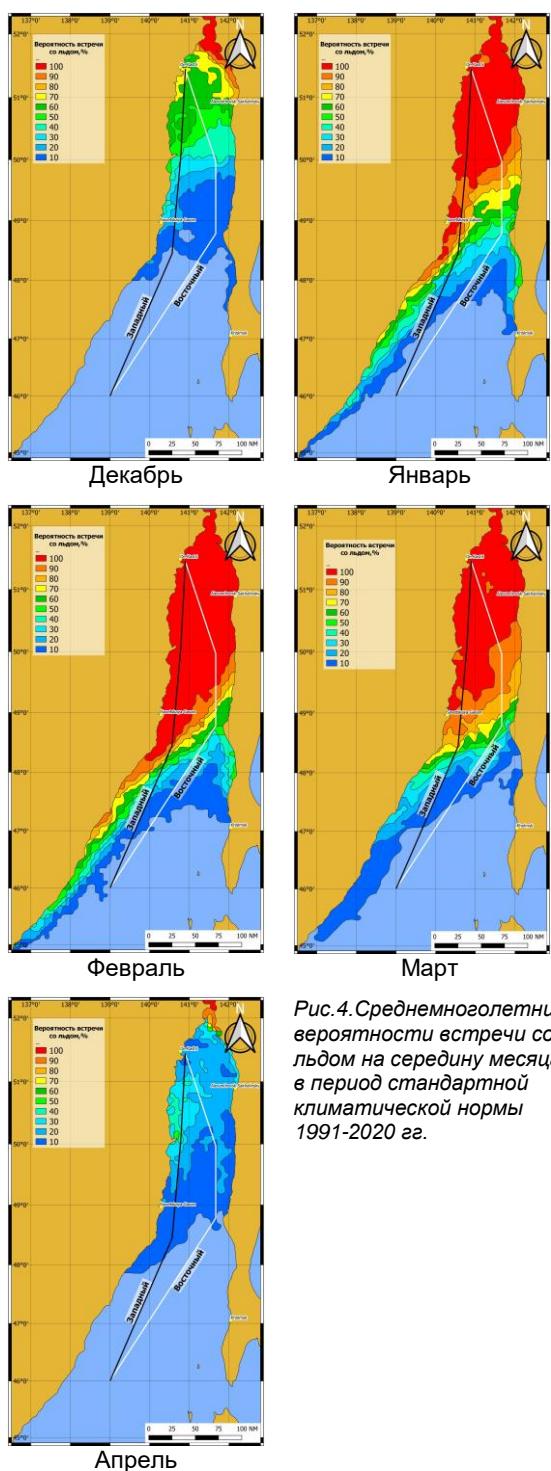


Рис. 4. Среднемноголетние вероятности встречи со льдом на середину месяца в период стандартной климатической нормы 1991-2020 гг.

Общая протяженность участка пути во льдах на Западном и Восточном маршрутах в период максимального развития ледяного покрова примерно одинакова (~270-280 миль). В феврале ледяной покров представлен тонким однолетним, серо-белым и серым льдом (в средних пропорциях 20, 50 и 30% соответственно). Толщина льда варьирует от 30 до 40 см.

Изменение характеристик ледяного покрова от февраля к марта весьма значительно. Поэтому, более логичным является выделение областей с однородными характеристиками ледяного покрова. Доминирующими видами льда в марте остаются тонкий однолетний, серо-белый и серый, но пропорции более толстых льдов, относительно февраля, увеличиваются в среднем на 10%. Характерной особенностью является тот факт, что в зоне 100% вероятности встречи со льдом доля ниласовых льдов составляет не менее 3 баллов. Другими словами, при проходе по любому выбранному маршруту у судоводителей имеется возможность манёвра. Толщина льда в марте колеблется в широких пределах от 25 до 50 см.

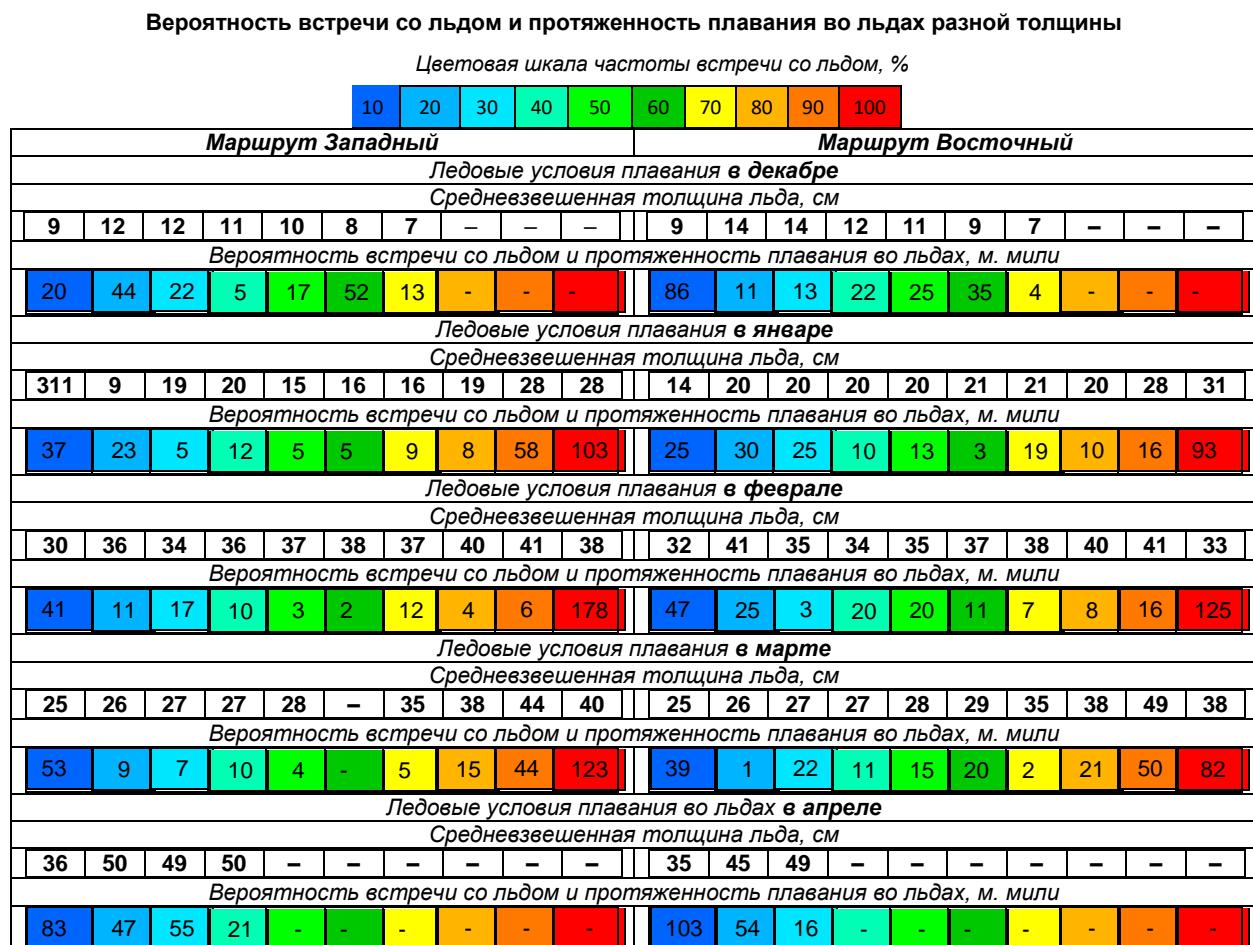
В период максимального развития ледовых процессов целесообразно учитывать протяженность пути в тяжелом районе, а также сплоченность ледяного покрова. Если сравнить протяженность пути с вероятностью встречи со льдом 50-100% на Западном и Восточном маршрутах, то на последнем она будет на ~50 миль короче. Учитывая потерю скорости движения в тяжелых ледовых участках, данное обстоятельство может стать решающим при выборе маршрута.

В апреле ледяной покров активно разрушается под влиянием солнечной радиации. Под воздействием набирающего силу летнего муссона обломки ледяных полей, несяки<sup>1</sup> и битый лед концентрируются вдоль западного побережья Татарского пролива в районе 50 и 51° с. ш. Как правило, эти остатки ледяного массива сбиваются в полосы, реже представлены ограниченными областями льда различной сплоченности. Для мореплавания такие зоны не представляют серьёзного препятствия, т.к. их обходят путём маневрирования по редкому льду или по чистой воде.

<sup>1</sup> большой торос или группа смерзшихся торосов, представляющих собой отдельную льдину, находящуюся

на плаву. Может выступать над уровнем моря на высоту до 5 м.

Таблица 2



### Заключение

Впервые выполнен анализ ледовых условий, осреднённых за период стандартной климатической нормы с 1991 по 2020 гг. на середину месяца в период с декабря по апрель в акватории Татарского пролива. За исследуемый период ледовитость пролива сохранялась неизменной. Наклон линейного тренда отсутствует, что косвенно подтверждает характер колебаний интегральной кривой аномалий ледовитости. Среднесезонное значение ледовитости составило 29%, максимум – 43 % (2001 г), минимум – 14% (1991 г). Продолжительность ледового периода ~ 160 сут. Во внутрисезонном ходе максимум ледовитости отмечался в феврале, со смещением на одну-две декады как на более ранние, так и на более поздние сроки.

Сравнительный анализ условий движения в ледяном покрове нефтеналивных танкеров типа Афрамакс (ледовый класс по международной классификации ICE-1C), которые обеспечивают

челночную перевозку нефти из порта Де-Кастри до портов Японии и Южной Кореи по Западному и Восточному маршрутам, позволил заключить, что наиболее сложные условия ледового плавания характерны для периода максимального развития ледяного покрова (февраль-март). Танкерам необходимо преодолевать в прикромочной зоне пояс однолетнего льда, средневзвешенная толщина которого может достигать 40-50 см, двигаясь по любому из выбранных маршрутов. Общая протяженность участка пути во льдах на Западном и Восточном маршрутах примерно одинаковая и составляет ~ 280 в феврале и ~ 270 миль в марте. Протяженность пути в поясе очень сплоченных однолетних льдов варьирует от 20 до 60 миль. Основным критерием выбора маршрута при прочих равных условиях должен являться прогноз ветра.

В декабре, январе и апреле ледовые условия не являются критичными для нефтеналивных танкеров, имеющих ледовый класс ICE-1C.

### Литература

- Лобанов В.Б., Данченков М.А., Лучин Е.В., Мезенцева Л.И., Пономарев В.И., Соколов О.В., Трусенкова О.О., Устинова Е.И., Ушакова Р.Н., Хен Г.В., 2014, Глава 5.4. Дальневосточные моря России. В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва, Росгидромет, стр. 684-743.
- Малинин, В.Н., Вайновский П.А., 2019. Когда наступает безледный режим регионов Арктики? Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, (56), стр. 98-109.

3. Пищальник В.М., Дорофеева Д.В., Минервин И.Г., Шумилов И.Г., Никулина И.В., 2019. Межгодовая динамика аномалий ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2018 г. Известия ТИНРО. (196), стр. 114-122. <https://doi.org/10/26428/1606-9919-2019-196-114-122>
4. Плотников В.В. 2002. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. Владивосток: Дальннаука, Глава 5.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660472. Программный комплекс для расчета площади ледяного покрова в Охотском и Японском морях по данным ДЗЗ (ПК «ЛЁД»). Авторы: Пищальник В.М., Бобков А.О., Романюк В.А. Дата гос. регистрации в Росреестре программ для ЭВМ 01 октября 2015 г.
6. Шатилина Т. А., Цициашвили Г. Ш., Радченкова Т. В. 2006. Опыт использования метода интервального распознавания для прогноза экстремальной ледовитости Татарского пролива (Японское море). Метеорология и гидрология. (10), стр. 65-73.
7. Якунин Л.П., Плотников В.В., Петров А.Г. 2003. Ледовые условия. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8: Японское море; вып. 1: Гидрометеорологические условия. — СПб.: Гидрометеоиздат, стр. 347–394.
8. Zarubina, D.V., Pishchalnik, V.M., Romanyuk, V.A. 2021. Comparative analyses of changes in the ice cover of the Tatar Strait in relation to 1961-1990 and 1991-2020 climatic norms. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 946 012025, DOI:10.1088/1755-1315/946/1/012025.
9. Pishchalnik V.M. Dorofeyeva D.V., Truskov P.A., Romanyuk, V.A., Minervin, I.G. 2022. Variations in the volume of ice in the sea of Okhotsk and the Tatar Strait at the phase of maximum ice extent development for 2000–2020. Continental Shelf Research, DOI:10.1016/j.csr.2022.104663.

#### References

1. Lobanov V.B., Danchenkov M.A., Luchin E.V., Mezenceva L.I., Ponomarev V.I., Sokolov O.V., Trusenkova O.O., Ustinova E.I., Ushakova R.N., Hen G.V., 2014, Glava 5.4. Dal'nevostochnye morya Rossii. V kn.: Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Far Eastern Seas of Russia. Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and Its Impact in the Russian Federation]. Moskva, Rosgidromet, str. 684-743.
2. Malinin, V.N., Vajnovskij P.A., 2019. Kogda nastupaet bezlednyj rezhim regionov Arktiki? [When is the ice-free regime of the Arctic regions?] Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta, (56), str. 98-109.
3. Pishchal'nik V.M., Dorofeeva D.V., Minervin I.G., SHumilov I.G., Nikulina I.V., 2019. Mezhgodovaya dinamika anomalij ledovitosti Tatarskogo proliva s 1882 po 2018 g. [Annual dynamics of ice anomalies of the Tatar Strait from 1882 to 2018] Izvestiya TINRO. (196), str. 114-122. <https://doi.org/10/26428/1606-9919-2019-196-114-122>
4. Plotnikov V.V. 2002. Izmenchivost' ledovyh usloviy dal'nevostochnyh morej Rossii i ih prognoz. [Variability of ice conditions of the Far Eastern seas of Russia and their forecast] Vladivostok: Dal'nauka, Glava 5.
5. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registraci programmy dlya EVM № 2015660472. Programmnyj kompleks dlya rascheta ploshchadi ledyanogo pokrova v Ohotskom i Yaponskom moryah po dannym DZZ (PK «LYOD») [Software complex for calculating the ice cover area in the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan according to DZZ (PC "ICE")]. Avtory: Pishchal'nik V.M., Bobkov A.O., Romanyuk V.A. Data gos. registraci v Rosreestre programm dlya EVM 01 oktyabrya 2015 g.
6. SHatilina T. A., Ciciashvili G. SH., Radchenkova T. V. 2006. Opty ipol'zovaniya metoda interval'nogo raspoznavaniya dlya prognoza ekstremal'noj ledovitosti Tatarskogo proliva (Yaponskoe more) [Experience in using interval recognition to predict extreme ice content of the Tatar Strait (Sea of Japan)]. Meteorologiya i gidrologiya. (10), str. 65-73.
7. YAKUNIN L.P., Plotnikov V.V., Petrov A.G. 2003. Ledovye usloviya. Gidrometeorologiya i hidrohimiya morej. T. 8: YAponskoe more [Ice conditions. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. T. 8: Sea of Japan]; vyp. 1: Gidrometeorologicheskie usloviya. — SPb.: Gidrometeoizdat, str. 347–394.
8. Zarubina, D.V., Pishchalnik, V.M., Romanyuk, V.A. 2021. Comparative analyses of changes in the ice cover of the Tatar Strait in relation to 1961-1990 and 1991-2020 climatic norms. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 946 012025, DOI:10.1088/1755-1315/946/1/012025.
9. Pishchalnik V.M. Dorofeyeva D.V., Truskov P.A., Romanyuk, V.A., Minervin, I.G. 2022. Variations in the volume of ice in the sea of Okhotsk and the Tatar Strait at the phase of maximum ice extent development for 2000–2020. Continental Shelf Research, DOI:10.1016/j.csr.2022.104663.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Дарья Васильевна Зарубина**, научный сотрудник научно исследовательской лаборатории Дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета и Российской академии наук, 693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, e-mail: dariadorofeyeva26@gmail.com

**Daria V. Zarubina**, research assistant Earth Remote Sensing Laboratory Sakhalin state University, Lenina st., 290, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation, e-mail: dariadorofeyeva26@gmail.com

**Владимир Михайлович Пищальник**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно исследовательской лаборатории Дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета и Российской академии наук, 693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru

**Валерий Анатольевич Романюк**, кандидат географических наук, руководитель группы ледовых технологий ООО «СахалиНИПИ нефти и газа», 693000, Южно-Сахалинск, ул. Амурская 53, e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

**Vladimir M. Pishchalnik**, Dr. Sci. ,Eng), Professor, Chief Scientific Officer Earth Remote Sensing Laboratory Sakhalin state University, Lenina st., 290, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru

**Valery A. Romanyuk**, Ph.D. (Geog), Head of the Ice Technology Group of SakhalinNIP oil and gas LLC, Amurskaya st., 53, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation, e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 25.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.04.2022.

Принята к публикации/accepted for publication .24.04.2022.

## ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ

## СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

## SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Научная статья

УДК 621.7.08

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.005>

### Метод косвенного контроля формы оболочечных конструкций глубоководных аппаратов с применением современных средств измерений

Г.Р. Дзюнин<sup>1</sup> g.dzjunin@narfu.ru, С.А. Рusanovskiy<sup>1</sup> s.rusanovskiy@narfu.ru,  
М.П. Худяков<sup>1</sup> m.khudakov@narfu.ru, Д.Л. Деснев<sup>2</sup> ddl86@mail.ru

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,

<sup>2</sup>АО «ПО «СЕВМАШ»

**Аннотация.** На этапе предстапельной и стапельной сборки элементов корпусов глубоководных аппаратов требуется выполнять систематический контроль формы элементов для обеспечения собираемости конструкции. В процессе установки вварного насыщения в корпус также требуется выполнять контроль механически обрабатываемых поверхностей разделок. В статье рассмотрено измерение формы цилиндрической обечайки с помощью лазерного сканера и лазерного трекера. Осуществлено сравнение результатов измерений фактической формы цилиндрической обечайки с данными её CAD-модели. Осуществлялись измерения поверхности оболочечной цилиндрической конструкции. В процессе анализа результатов измерений было проведено сравнение результатов, полученных при помощи rulette и отвеса, а также трекером и сканером. Проведенное в работе исследование позволило сделать вывод о применимости подобных средств измерений в контексте существующей технологии строительства корпусов глубоководных аппаратов. Были определены дальнейшие пути развития технологии косвенного контроля при постройке корпусов глубоководных аппаратов. В частности отмечена важность определения и оценки отдельных составляющих и суммарной технологической погрешности.

**Ключевые слова:** глубоководные аппараты, косвенный контроль формы, CAD-модель, лазерный трекер, лазерный сканер.

**Для цитирования:** Дзюнин Г.Р., Рusanовский С.А., Худяков М.П., Деснев Д.Л. Метод косвенного контроля формы оболочечных конструкций глубоководных аппаратов с применением современных средств измерений, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 42—50

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.005>

### The method of indirect control of the shape of underwater shipbuilding hulls with the use of modern measuring instruments

Georgiy R. Dzyunin<sup>1</sup> g.dzjunin@narfu.ru, Sergey A. Rusanovskiy<sup>1</sup> s.rusanovskiy@narfu.ru,  
Mikhail P. Khudyakov<sup>1</sup> m.khudakov@narfu.ru, Dmitriy L. Desnev<sup>2</sup> ddl86@mail.ru

<sup>1</sup>Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», <sup>2</sup>JSC «PO «SEVMASH»

**Abstract.** At the stage of pre-slipway and slipway assembly of hull elements of underwater vehicles, it is required to perform systematic control of the shape of the elements to ensure the assembling of the structure. During the installation of welding flanges in the housing, it is also required to monitor the mechanically processed cutting surfaces. The article considers the measurement of the shape of a cylindrical shell using a laser scanner and a laser tracker. The measurement results of the actual shape of the cylindrical shell are compared with the data of its CAD model. Measurements of surfaces of shell cylindrical structure were performed. In the process of analyzing the measurement results, the results obtained by the roulette and the plumb, and also by the tracker and the scanner were compared. The research carried out in the work allowed us to conclude that such measuring instruments are applicable in the context of the existing technology for the construction of underwater vehicles. Further ways of developing indirect control technology during the construction of underwater vehicle hulls were identified. In particular, the importance of determining and evaluating individual components and total process error was noted.

**Key words:** underwater vehicles, indirect shape control, CAD model, laser tracker, laser scanner.

**For citation:** Georgiy R. Dzyunin, Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, Dmitriy L. Desnev The method of indirect control of the shape of underwater shipbuilding hulls with the use of modern measuring instruments, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 42—50

## Введение

В процессах строительства сложных инженерных объектов на всех этапах их жизненного цикла просматривается отчетливая и долговременная тенденция к снижению доли ручного труда. Так же очевидно проявляется стремление к снижению субъективности принимаемых технологических решений. В судостроении, как и в других сложных научно-ёмких отраслях, это решается путем автоматизации как основных, так и обеспечивающих производственных процессов [1, 2].

Одним из таких процессов является текущий измерительный контроль размеров и формы корпусных конструкций судов в течении всего цикла их постройки [3-6]. Для этого широко применяют традиционные прямые и косвенные методы измерений. При этом используют каркасы, шаблоны, отвесы, рулетки, линейки, коллиматоры, теодолиты, и тому подобные средства [7]. Для решения ряда задач наряду с традиционными средствами измерений успешно применяют цифровые тахеометры, лазерные трекеры, лазерные сканеры [8]. Однако методы и способы их эффективного применения для измерительного контроля геометрии корпусных конструкций судов требуют дальнейшего изучения и практической отработки [9].

### 1. Методы и Материалы

Трехмерное лазерное сканирование на сегодня является одним из наиболее перспективных методов контроля и измерений сложных крупногабаритных объектов. Этот метод и соответствующие средства позволяют оперативно получать подробную и актуальную 3D-информацию об объекте. Её использование может быть эффективным как для прямого, так и для реверс-инжиниринга [10], в частности для своевременного внесения корректировок в процесс изготовления объекта производства.

Одним из эффективных методов контроля формы крупногабаритных конструкций является косвенный контроль, сочетающий измерения и последующую аналитическую обработку их результатов.

Применение подобного контроля целесообразно при выполнении как механообрабатывающих, так и сборочных операций на корпусах глубоководных аппаратов [11], в частности при обработке кромок отверстий [9], посадочных мест для оборудования,стыковки секций корпуса и других подобных производственных задач.

Например, данные о фактической форме поверхности корпуса необходимы при автоматизированной механической обработке под сварку кромок отверстий в толстолистовых конструкциях. Как показывает практика, отклонения фактической формы от номинальной могут значительно превышать допуски на мехобработку. Соответственно, необходимо на базе этих данных корректировать программы управления оборудованием как в режиме постоянной коррекции, так и в следящем режиме [12, 13].

Рассмотрим применимость современных средств измерений на примере косвенного контроля формы цилиндрической конструкции (рис. 1).

Радиус измеряемой конструкции по внутренней поверхности  $R = 796$  мм, толщина оболочки – 4 мм.

Материал конструкции – алюминиевый сплав.

Было выполнено сравнение результатов измерений а) традиционным ручным методом; б) с помощью лазерного трекера; в) с использованием лазерного сканера.

#### а) измерение ручными инструментами по существующей технологии.

Для контроля формы цилиндрической конструкции, CAD-модель которой показана на рисунке 1, были выполнены измерения по 16 равноудаленным радиально размеченным на торцах конструкции образующим [14]. Схема расположения соответствующих контрольных точек показана на рис. 2.



Рис. 1. CAD-модель измеряемой цилиндрической конструкции

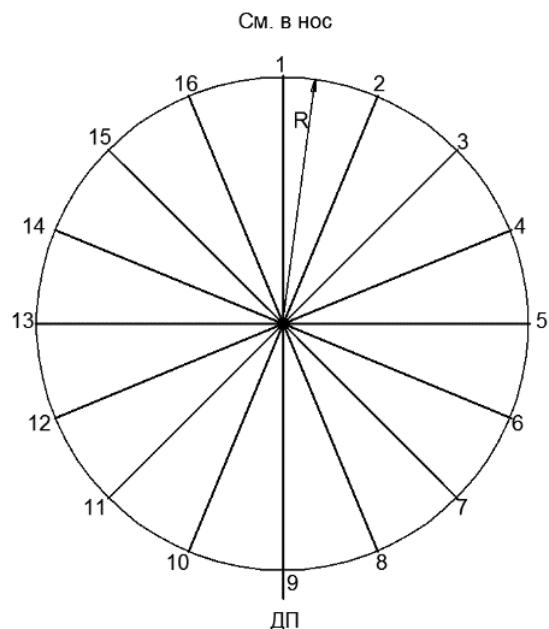


Рис. 2. Схема расположения контрольных точек

Измерения выполнялись с помощью отвеса, рулетки 2-го класса точности с ценой деления 1 мм.

**б) измерение лазерным трекером по существующей технологии.**

Были выполнены измерения по 16 равноудаленным радиально расположенным контрольным образующим, расположенным по ребрам жесткости (сечениям), показанным на рис. 2.

Измерения были выполнены лазерным трекером Leica AT402 (рис. 3).

Трекер Leica AT402 позволяет производить линейные измерения с точностью до 0,03 мм в зависимости от расстояния до объекта и условий выполнения измерений (согласно Приложения к свидетельству № 56786 об утверждении типа средств измерений точность незначительно выше, но будем использовать указанное выше значение).

Для удобства проведения измерений использовался комплект для измерения точек на поверхности (на основе подставки для измерения точек с коническим щупом Leica 575 847).

Измерения выполнялись с двух установок средства измерений (стоечек), примерно симметричных относительно диаметральной плоскости конструкции.



Рис. 3. Измерение цилиндрической конструкции с помощью лазерного трекера

**в) измерение конструкции с применением трехмерного лазерного сканирования.**

Трехмерное лазерное сканирование [15] было выполнено лазерным сканером Surphaser 100HSX (см. рис. 4). Сканер Surphaser 100HSX позволяет производить измерения с уровнем шума до 0,07-0,3 мм ( $1\sigma$ ) на дистанции 10 м (согласно Приложения к свидетельству № 65273 об утверждении типа средств измерений - граница

допускаемой абсолютной погрешности измерений  $\pm(0,6+0,06 \cdot 10^{-3}L)$ .



Рис. 4. Лазерный сканер Surphaser 100HSX

Для контроля формы цилиндрической конструкции в специализированном программном обеспечении Geomagic Desing X было получено облако точек для 4-х отдельных стоечек сканера.

Данные каждой стоянки были объединены посредством общих реперных точек и совмещены с созданной ранее 3D-моделью измеряемой цилиндрической конструкции (рис. 5).

Geomagic Desing X совмещает стоянки сканера и 3D-модель, усредняя абсолютные значения с общей погрешностью совмещения не более 0,7 мм.

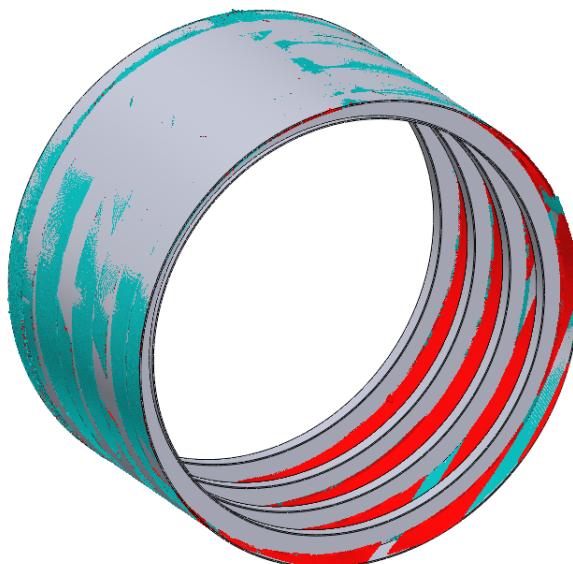


Рис. 5. Соовмещенная 3D-модель с облаком точек

## 2. Результаты

### а) результаты измерений ручными инструментами по существующей технологии.

Результаты измерений, выполненных по традиционной технологии с помощью ручного измерительного инструмента, представлены в таблице 1.

**Таблица 1**  
**Результаты измерений цилиндрической обечайки**

Образующая	Отклонения по переднему торцу обечайки, мм	
	Отклонение от номинала	Отклонение от среднего
1	4	2
2	6	4
3	-4	-6
4	3	1
5	5	3
6	2	0
7	3	1
8	2	0
9	-3	-5
10	4	2
11	-1	-3
12	-2	-4
13	2	0
14	5	3
15	7	5
16	4	2

Можно отметить относительно большой разброс значений отклонений, субъективность и низкую точность измерений, характерную для традиционной технологии их выполнения и используемых средств.

#### **б) результаты измерений, выполненных с помощью лазерного трекера.**

Результаты измерений в виде отклонений фактических значений радиусов от их номинальных значений представлены в таблице 2.

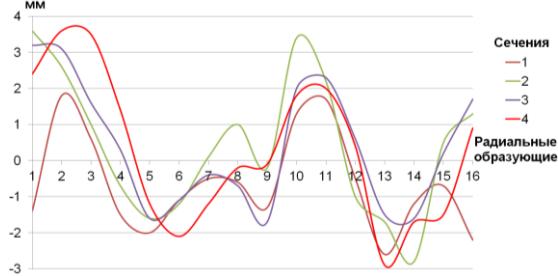
**Таблица 2**  
**Результаты измерений цилиндрической обечайки**

Образующая	Отклонения по сечениям, мм			
	1	2	3	4
1	-1,4	3,6	3,2	2,4
2	1,8	2,6	3,1	3,6
3	0,6	1,0	1,6	3,5
4	-1,5	-0,7	0,3	1,4
5	-2,0	-1,6	-1,6	-1,2
6	-1,1	-1,2	-1,1	-2,1
7	-0,5	0,1	-0,4	-1,2
8	-0,6	1,0	-0,7	-0,2
9	-1,3	-0,2	-1,7	-0,1
10	1,3	3,4	2,0	1,8
11	1,7	2,2	2,3	2,0
12	-0,5	-1,0	0,6	0,4
13	-2,6	-1,7	-1,5	-2,9
14	-1,2	-2,8	-1,6	-1,7
15	-0,7	0,5	0,2	-1,5
16	-2,2	1,3	1,7	0,9

В графической форме отклонения на примере сечения 4 показаны на рисунке 6 (размер отклонений для наглядности увеличен в 20 раз) и на рисунке 7 для всех сечений.



**Рис. 6. Отклонения от цилиндричности конструкции по радиальной образующей №4**



**Рис. 7. Отклонения от цилиндричности конструкции по радиальному образующему**

Максимальные отклонения фактических значений радиусов от их номинальных значений составили от -2,9 мм до +3,6 мм. Так как допустимое отклонение формы цилиндрических конструкций на данном диаметре [16] составляет  $\pm 1,6$  мм, сделано заключение о негодности рассматриваемой конструкции по форме.

#### **в) результаты измерений, выполненных с помощью лазерного сканера.**

Geomagic Desing X позволяет получить цветовую диаграмму отклонений от теоретической 3D-модели (рис. 8) и гистограмму их распределения (рис. 9).

Цветовая диаграмма позволяет наглядно представить общий характер искажения формы в 3D пространстве. Кроме того, можно визуально оценить величину, знак и характер отклонений в локальных областях расположения важных элементов конструкции. Однако, для более точной оценки и закономерностей распределения отклонений формы конструкции целесообразней использовать гистограмму распределения отклонений измерительных данных (рис. 9).

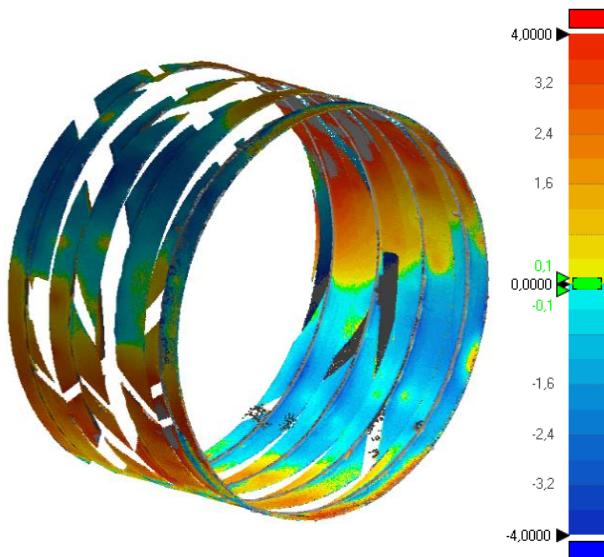


Рис. 8. Цветовая диаграмма отклонений результатов измерений от теоретической 3D-модели

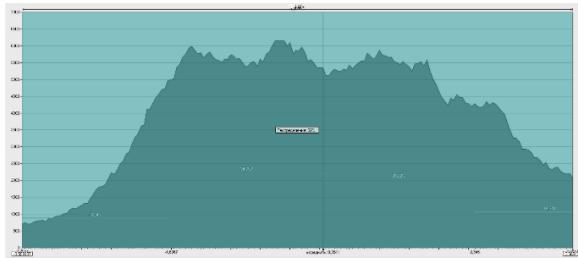


Рис. 9. Гистограмма распределения отклонений по данным сканирования

### 3. Обсуждение

Для обоснованного и успешного применения на практике рассматриваемого в статье метода требуется решение ряда вопросов [17, 18], включающих оценку погрешности самого средства измерения. Например, определение и оценка методической и суммарной погрешностей косвенных измерений с помощью лазерного сканирования при выполнении типовых корпусных работ. Как это выполнено в случае с лазерным треккером при его апробации на АО «ПО «Севмаш» [15, 21].

Суммарная погрешность для подобных объектов складывается из систематической и случайной погрешностей, зависящих от совокупности технологических факторов влияния.

На примере сечения 4 на рисунках 10 и 11 показан характер систематической и случайной составляющих погрешности формы конструкции.

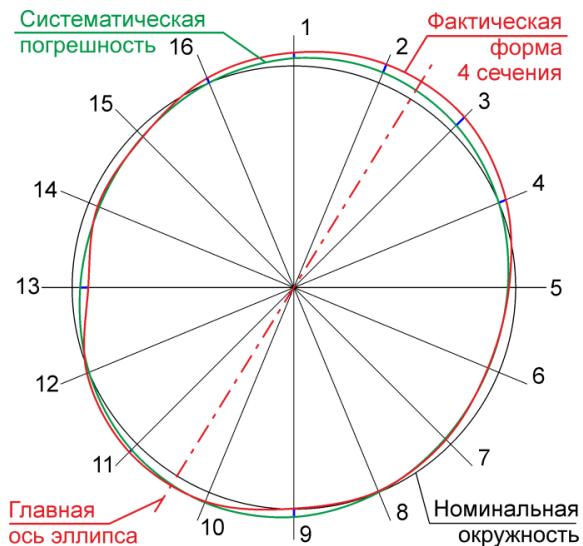


Рис. 10. Систематическая составляющая погрешности и фактическая форма конструкции

Для измерений, полученных с помощью трекера систематическая погрешность формы представляет собой эллиптичность, как это видно на рисунке 10. Также можно оценить деформацию обечайки в виде определенной степени отклонения от круглости, как показано на рисунке 11.

Обычно измерения с помощью трекера и сканера, выполненные без существенного изменения условий измерений, достаточно хорошо описываются нормальным распределением.

Однако, измерения в рассматриваемой задаче производились с четырех стоянок сканера с последующим виртуальным совмещением данных средствами Geomagic Design X. Кроме того, существенное значение при измерениях сканером имеет разница в углах наклона касательных к измеряемой поверхности в точках измерения лазерным лучом.



Рис. 11. Определение характера систематической и случайной составляющих погрешности формы конструкции

С учетом этих обстоятельств было решено проверить соответствие измерительных данных гипотезе нормального распределения (рис. 12). На рисунке можно проследить расположение отдельных стоянок сканера и суммарное/частное теоретическое распределение полученной погрешности формы.

Ошибка программного совмещения результатов сканирования по отдельным стоянкам составила 0,7 мм, что согласуется с указанной погрешностью совмещения и усреднения в Geomagic Desing X.

При анализе данных было выявлено, что итоговая точность современных сканирующих средств измерений при соблюдении нормальных [19] условий выполнения измерений, в основном определяется точностью используемого программного обеспечения для обработки полученных результатов.

Это можно наблюдать на рисунке 12.

При общем сохранении нормальности распределения плотности вероятностей результатов сканирования значительную долю данных составляет измерительный «белый шум». Соответствующие границы равномерно распределенных данных на рисунке 12 отмечены горизонтальными белыми пунктирными линиями. По

результатам для стоянки 4 видно, что интенсивность «шума» зависит от выбора положения сканера и условий окружающей среды (в частности, от освещенности и угла отражения от измеряемого объекта).

### Заключение

Результаты прямых и косвенных измерений круговой формы цилиндрической конструкции, показывают, что метод косвенного контроля с применением трехмерного лазерного 3D-сканирования может быть использован как альтернативный способ измерения геометрических параметров и анализа формы конструкций [20]. Метод косвенного контроля позволяет сократить нанесение разметки и ориентирование конструкции относительно баз отсчета, в отличие от традиционных методов измерения конструкций.

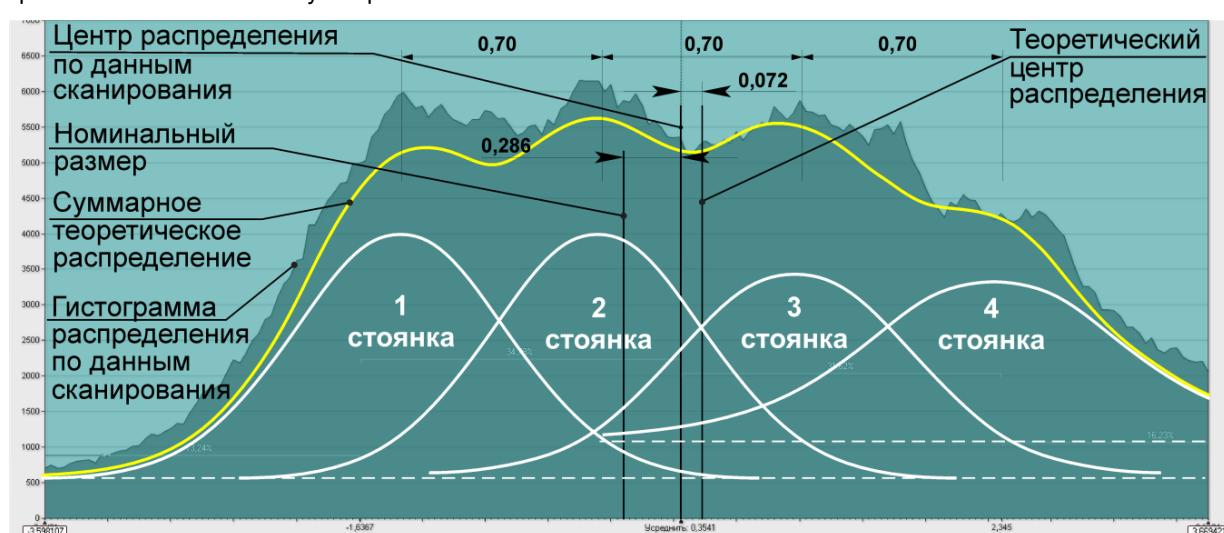


Рис. 12. Анализ данных лазерного сканирования на предмет исследования закономерностей формирования результатов измерений

Применение подобного измерительного оборудования позволяет систематически получать необходимые данные для «цифрового двойника» изделия, что необходимо для повышения уровня автоматизации в отрасли.

Точность измерения лазерным сканером Surphaser 100HSX составляет до 0,07 мм (в рассматриваемом эксперименте – 0,3 мм). Но это значение значительно увеличивается погрешностью программной обработки результатов и слияния облаков точек по отдельным стоянкам [20]. И суммарная погрешность составляет уже 0,7 мм, что на порядок меньше точности измерения при помощи лазерного трекера Leica AT402 (0,03 мм).

Согласно действующим требованиям при изготовлении корпусных конструкций цена деления используемых средств измерений в судостроении должна быть не более 1 мм. Паспортная погрешность традиционных средств измерений составляет 0,7 мм.

Таким образом, точность получаемых данных при использовании сканера является достаточной для рассмотренной измерительной задачи. И имеет

преимущество перед традиционными методами в получении статистически более надежных результатов при сравнимых погрешностях.

Но при перспективном повышении требований к точности изготавливаемых конструкций, точность используемых средств должна быть существенно выше.

Например, для механической обработки корпусных конструкций требования к точности средств измерений составляют 0,05 мм. В подобных случаях целесообразным является применение трекера.

Применение сканера также допустимо, но для локальных сканов, не требующих слияния облаков точек и использования версии сканера, имеющей наиболее низкий уровень шума сигнала.

Для повышения уровня автоматизации при работе с «цифровым двойником» требуется определение факторов влияния и функциональной модели их взаимосвязи с погрешностями формы при изготовлении крупногабаритных толстолистовых корпусных конструкций.

## Литература

1. Cosarca C. Sisteme De Masurare In Industrie / Cosarca C // Bucharest, Romania — 2009.
2. Möhlenbrink W., Schwieger V. Navigation and Quality of Construction Processes, XXIII FIG Congress Munich, Germany, 2006;
3. Aleksander Kniat. Optimization of transformation of measurements of ship hull blocks / POLISH MARITIME RESEARCH 4(62) — 2009. — Vol 16. — pp. 32-37. <https://doi.org/10.2478/v10012-008-0053-1>.
4. Manninen M. Practice Report «3D Measurement and Analysis of a Ship Block» / Manninen M., Kaisto I. // A.M.S. Ltd, Oulu, Finland, — 1996.
5. Shimizu H. Evaluation of Three Dimensional Coordinate Measuring Methods for Production of Ship Hull Blocks / Shimizu H. // Proceedings of The 12th (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, — 2002.
6. Schofield W. Engineering Surveying / Schofield W., Breach M. // Ed. Elsevier Ltd, Oxford, Great Britain — 2007. — 640p.
7. Дзюнин Г.Р. Обзор существующих методов и средств измерений геометрии корабельных конструкций в АО «ПО «СЕВМАШ» / Дзюнин Г.Р., Кузьмин Д.В. // МОЛОДОЙ УЧЕНЫЙ — 2019. — №1. — том 37 (275). — С. 93-98.
8. Popia M. 3D measurements for dimensional control of a ship unit using Leica TDRA6000 Laser Station technology / M. Popia (Ilica), R. M. Mihalache (Ficiuc) // RevCAD Journal of Geodesy and Cadastre, Volume 13 — 2012. — pp. 147-157.
9. Русановский С.А. Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под вварку насыщения / Русановский С.А., Худяков М.П., Черенков Н.И. // Морские интеллектуальные технологии, — 2020. — №1. — том 1. — С. 28-37. DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.006
10. Дзюнин Г.Р. Реверсное проектирование на примере разработки 3d-модели стенда испытаний виброшумовых характеристик / Дзюнин Г.Р., Дятлев А.В. // Сборник докладов Десятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «БУДУЩЕЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ РОССИИ», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (Москва), — 2017. — С. 556-560.
11. Александров В.Л., Догадин А.В., Макаров В.В., Роганов А.С., Уткин В.Е. «Технология постройки подводных лодок». Учебник. Санкт-Петербург 2006г. УДК 629.12.002.
12. Klimchik, A. Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure / Alexandre Klimchik, Alexandre Ambiehl, Sébastien Garnier, Benoit Furet, Anatol Pashkevich // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, — 2017. — Vol. 48. — pp. 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.12.005>.
13. Khawli, Toufik Al et al. Introducing data analytics to the robotic drilling process / Toufik Al Khawli, Hamza Bendemra, Muddasar Anwar, Dewald Swart, J. Dias // Industrial Robot, — 2018. — №45. — pp. 371-378. <https://doi.org/10.1108/IR-01-2018-0018>.
14. Л.Ц. Адлерштейн, В.Ф. Соколов «Справочник по судовым разметочным и проверочным работам» Изд. «Судостроение» Ленинград 1988г. 400С. УДК 629.12.002.011.
15. Михайлов В.С., Савинов А.В., Деснев Д.Л., Медведева В.Е. Внедрение цифровых технологий в метрологическом обеспечении производства АО «ПО «Севмаш»/ Судостроение – 2019 - №6 – С. 32 – 36
16. РД 5 «МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО КОНТРОЛЮ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ».
17. Ben Hughes. Laser tracker error determination using a network measurement / Ben Hughes, Alistair Forbes, Andrew Lewis, Wenjuan Sun, Dan Veal and Karim Nasr // IOP Publishing Ltd, Measurement Science and Technology, — 2011. — Volume 22. — Number 4.
18. Wang L. et al. Performance evaluation of laser trackers using the network method / Wang, L., Muralikrishnan, B., Hernandez, O. I., Shakarji, C., & Sawyer, D. // Measurement. — 2020. — Т. 165. — pp.108-165.
19. ГОСТ 8.050-73 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений.
20. Stenz, U. High-Precision 3D Object Capturing with Static and Kinematic Terrestrial Laser Scanning in Industrial Applications – Approaches of Quality Assessment / Stenz, U.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. // Remote Sensing. — 2020. — 12(290). <https://doi.org/10.3390/rs12020290>
21. Михайлов В.С., Савинов А.В., Деснев Д.Л., Медведева В.Е. Разработка и внедрение цифровых технологий сквозного контроля геометрических параметров при изготовлении корпуса, монтажа трубопроводов и оборудования/ Судостроение – 2020 - №3 – С.33 – 36.

## References

1. Cosarca C. Sisteme De Masurare In Industrie / Cosarca C // Bucharest, Romania — 2009.
2. Möhlenbrink W., Schwieger V. Navigation and Quality of Construction Processes, XXIII FIG Congress Munich, Germany, 2006;
3. Aleksander Kniat. Optimization of transformation of measurements of ship hull blocks / POLISH MARITIME RESEARCH 4(62) — 2009. — Vol 16. — pp. 32-37. <https://doi.org/10.2478/v10012-008-0053-1>.
4. Manninen M. Practice Report «3D Measurement and Analysis of a Ship Block» / Manninen M., Kaisto I. // A.M.S. Ltd, Oulu, Finland, — 1996.
5. Shimizu H. Evaluation of Three Dimensional Coordinate Measuring Methods for Production of Ship Hull Blocks / Shimizu H. // Proceedings of The 12th (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, — 2002.
6. Schofield W. Engineering Surveying / Schofield W., Breach M. // Ed. Elsevier Ltd, Oxford, Great Britain — 2007. — 640p.

- 2007. — 640p.
7. Dzyunin G.R. Review of existing methods and instruments for measuring the geometry of ship structures in JSC "PO" SEVMASH "/ Dzyunin G.R., Kuzmin D.V. // YOUNG SCIENTIST - 2019. — №1. — volume 37 (275). — S. 93-98.
  8. Popia M. 3D measurements for dimensional control of a ship unit using Leica TDRA6000 Laser Station technology / M. Popia (Ilica), R. M. Mihalache (Ficiuc) // RevCAD Journal of Geodesy and Cadastre, Volume 13 — 2012. — pp. 147-157.
  9. Rusanovsky S.A. Method for modeling a bore chamfer in a hull within the scope of submarine shipbuilding for welding-in of outfitting / Rusanovskiy S.A., Khudyakov M.P., Cherenkov N.I. // Marine Intelligent Technologies, - 2020. — №1. — part 1. — pp. 28-37. DOI 10.37220 / MIT.2020.47.1.006.
  10. Dzyunin G.R. Reverse design on the example of the development of a 3D-model of a vibration-noise characteristics test bench / Dzyunin G.R., Dyatlev A.V. // Collection of reports of the Tenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists (with international participation) "FUTURE OF ENGINEERING IN RUSSIA", Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University) (Moscow), — 2017 . — S. 556-560.
  11. Aleksandrov V.L., Dogadin A.V., Makarov V.V., Roganov A.S., Utkin V.E. "Technology of building submarines". Textbook. St. Petersburg 2006 UDC 629.12.002.
  12. Klimchik, A. Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure / Alexandre Klimchik, Alexandre Ambiehl, Sébastien Garnier, Benoit Furet, Anatol Pashkevich // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, — 2017. — Vol. 48. — pp. 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.12.005>.
  13. Khawli, Toufik Al et al. Introducing data analytics to the robotic drilling process / Toufik Al Khawli, Hamza Bendemra, Muddasar Anwar, Dewald Swart, J. Dias // Industrial Robot, — 2018. — №45. — pp. 371-378. <https://doi.org/10.1108/IR-01-2018-0018>.
  14. L.Ts. Adlershtein, V.F. Sokolov "Handbook of ship marking and verification works" Ed. "Shipbuilding" Leningrad 1988, — 400P. UDC 629.12.002.011.
  15. Mikhailov V.S., Savinov A.V., Desnev D.L., Medvedeva V.E. Implementation of digital technologies in metrological support of production of PO Sevmash JSC / Shipbuilding — 2019. — No. 6. — P. 32-36.
  16. RD 5 «METHODOLOGICAL INSTRUCTIONS FOR CONTROL OF THE FORM BY OPTICAL METHODS».
  17. Ben Hughes. Laser tracker error determination using a network measurement / Ben Hughes, Alistair Forbes, Andrew Lewis, Wenjuan Sun, Dan Veal and Karim Nasr // IOP Publishing Ltd, Measurement Science and Technology, — 2011. — Volume 22. — Number 4.
  18. Wang L. et al. Performance evaluation of laser trackers using the network method / Wang, L., Muralikrishnan, B., Hernandez, O. I., Shakarji, C., & Sawyer, D. // Measurement. — 2020. — T. 165. — pp.108-165.
  19. GOST 8.050-73 State system for ensuring the uniformity of measurements. Reference conditions for linear and angular measurements.
  20. Stenz, U. High-Precision 3D Object Capturing with Static and Kinematic Terrestrial Laser Scanning in Industrial Applications – Approaches of Quality Assessment / Stenz, U.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. // Remote Sensing. — 2020. — 12(290). <https://doi.org/10.3390/rs12020290>.
  21. Mikhailov V.S., Savinov A.V., Desnev D.L., Medvedeva V.E. Development and implementation of pass-through validation of geometrical parameters during construction of hull and installation of pipes and equipment/ Shipbuilding — 2020. — No. 3. — P. 33-36.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Георгий Робертович Дзюнин**, ассистент кафедры кораблестроения, Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова» в г. Северодвинске, 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6, e-mail: g.dzjunin@narfu.ru

**Georgy R. Dzyunin**, assistant of department of shipbuilding, Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov» in Severodvinsk, 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, Russian Federation, e-mail: g.dzjunin@narfu.ru

**Сергей Александрович Рusanовский**, старший преподаватель кафедры кораблестроения, Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова» в г. Северодвинске, 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6, e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

**Sergey A. Rusanovskiy**, The senior lecturer of department of shipbuilding, Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov» in Severodvinsk, 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, Russian Federation, e-mail: s.rusanovskiy@narfu

**Михаил Павлович Худяков**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии металлов и машиностроения, Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова» в г. Северодвинске, 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6, e-mail: m.khudyakov@narfu.ru

**Mikhail P. Khudyakov**, Ph.D. (Eng). The associate professor of department of technology of metals and mechanical engineering, Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov» in Severodvinsk, 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, Russian Federation, e-mail: m.khudyakov@narfu.ru

**Дмитрий Леонидович Деснев**, ведущий инженер по метрологии, АО «ПО «Севмаш», г. Северодвинск, Архангельская обл., 164500, Архангельское шоссе, 58, e-mail: ddl86@mail.ru

**Dmitry L. Desnev**, Leading Metrology Engineer JSC PO Sevmash, Severodvinsk, Arkhangelskaya oblast, 164500, Arkhangelskoye shosse, 58, e-mail: ddl86@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.12.2021.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.01.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2022.

**Научная статья**

УДК 621.791.75.052

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.006>

## **Совершенствование технологии сварки плакированной стали PCF36Z + 316L при постройке морских стационарных буровых платформ**

И.А. Гальцов<sup>1</sup> i.galjcov@narfu.ru, Е.В. Фомин<sup>1</sup> e.fomin@narfu.ru

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

**Аннотация** В работе представлены результаты разработки новой технологии сварки ледового дефлектора, морской ледостойкой стационарной платформы, из плакированной стали PCF 36Z + 316L, с комплексным воздействием на металл сварочной ванны, заключающийся во введении в хвостовую часть жидкого металла сварного валика охлаждающей присадки и низкочастотных поперечных колебаний сварочной проволоки.

Выявлено, что на образование сварного соединения тратится только четверть от общей теплоты дуги, а большая его часть расходуется на перегрев сварочной ванны, нагрев изделия, его деформацию, диффузию химических элементов между слоями. Эти процессы приводят к ухудшению структуры и свойств сварного соединения, значительному понижению качества сварных конструкций.

Установлено, что использование комплексного способа дуговой сварки позволяет, увеличить площадь поперечного сечения сварного валика, уменьшить тепловое воздействие на металл, уменьшить количество проходов при формировании соединения, без увеличения погонной энергии сварки, обеспечить качественную, аустенитно-ферритную структуру сварных валиков переходного и плакирующего слоя.

**Ключевые слова:** сварка, вибрация, холодная присадка, сварочная проволока, аустенит, феррит, сварочный валик, структура, температура, проход, сварочный ток, сталь.

**Для цитирования:** Гальцов И.А., Фомин Е.В. Совершенствование технологии сварки плакированной стали PCF36Z + 316L при постройке морских стационарных буровых платформ, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 51—56.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.006>

## **Improvement of PCF36Z + 316L clad steel welding technology in the construction of offshore stationary drilling platforms**

Igor A. Galjcov<sup>1</sup> i.galjcov@narfu.ru, Evgeny V. Fomin<sup>1</sup> e.fomin@narfu.ru

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

**Abstract** The paper presents the results of the development of a new technology for welding an ice deflector, a marine ice-resistant stationary platform made of PCF 36Z + 316L clad steel, with a complex effect on the metal of the welding bath, consisting in the introduction of a cooling additive and low-frequency transverse vibrations of the welding wire into the tail part of the liquid metal of the welded roller.

It is revealed that only a quarter of the total arc heat is spent on the formation of a welded joint, and most of it is spent on overheating of the welding bath, heating of the product, its deformation, diffusion of chemical elements between layers. These processes lead to deterioration of the structure and properties of the welded joint, a significant decrease in the quality of welded structures.

It is established that the use of an integrated arc welding method allows to increase the cross-sectional area of the welded roller, reduce the thermal effect on the metal, reduce the number of passes during the formation of the joint, without increasing the linear welding energy, to ensure a high-quality, austenitic-ferritic structure of the welded rollers of the transition and cladding layer.

**Key words:** welding, vibration, cold additive, welding wire, austenite, ferrite, welding roller, structure, temperature, passage, welding current, steel.

**For citation:** Igor A. Galjcov, Evgeny V. Fomin, Improvement of PCF36Z + 316L clad steel welding technology in the construction of offshore stationary drilling platforms, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 51—56.

### **Введение**

Морская ледостойкая стационарная платформа «Приразломная» (рис. 1), эксплуатируемая на шельфе Печерского моря (Штокманского нефтяного месторождения) представляет собой стальную гравитационную платформу, состоящую из кессона (основания) сухим весом 57000 тонн, размером

126×126×24,3 м, в котором размещены хранилища нефти объёмом 13000 тонн, топливные цистерны, водяной и твёрдый балласт, насосные станции. На палубе размером 93×93м расположено верхнее строение сухим весом 28000 тонн, предназначенное для бурения скважины, добычи нефти и первичной её переработки.



Рис. 1. Морская ледостойкая стационарная платформа «Приразломная»

После переработки нефть поступает в нефте хранилище, затем через отгрузочное устройство нефть перегружается на танкеры ледового класса грузоподъёмностью 60000 тонн. При разработке технологии сборки и сварки секций МЛСП «Приразломная», учитывалось множество неблагоприятных факторов, снижающих срок эксплуатации платформы. Основные факторы – тяжёлые природные условия в районе освоения шельфа. Эксплуатация конструкции платформы при температурах до  $-40^{\circ}\text{C}$ , постоянный контакт льда и морской воды создает опасность появления коррозии и хрупкого разрушения как основного металла, так и сварных соединений.

Для решения данной проблемы в конструкции платформы предусмотрен защитный пояс – ледовый дефлектор, выполненный из двухслойной плакированной хладостойкой стали марки PCF36Z + 316L толщиной 42мм «Voestalpine» Австрия.

Двухслойные стали позволяют резко уменьшить потребление дефицитных высоколегированных сталей без снижения работоспособности конструкций, но технология их сварки требует применения специальных сварочных материалов для получения качественного и работоспособного соединения [5,6].

Сталь PCF36Z + 316L состоит из двух слоев соединенных прокаткой [4].

Основной слой (толщиной 37мм) PCF36Z – сталь поставлялась под надзором морского регистра судоходства [1], феррито-перлитного класса с температурой эксплуатации до  $-60^{\circ}\text{C}$ , повышенной прочности  $\sigma_t=366$  МПа,  $\sigma_b=564$  МПа,  $\delta=21\%$ . Химический состав стали приведен в табл. 1.

Таблица 1  
Химический состав стали PCF 36Z

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
%							
0,077	0,33	1,45	0,006	0,007	0,015	0,22	0,07

Плакирующий слой (толщиной 5мм) 316L – сталь поставлялась под надзором морского регистра судоходства [1], аустенитного класса с температурой эксплуатации от  $-165$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ , механическими свойствами  $\sigma_{0,2}=195$  МПа,  $\sigma_b=450$  МПа,  $\delta=40\%$ . Химический состав стали приведен в табл. 2.

Таблица 2  
Химический состав стали 316L

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
%							
0,03	1,0	2,0	0,045	0,003	16,0÷18,0	10,0÷14,0	2,0÷3,0

Для сборки корпуса ледового дефлектора МЛСП «Приразломная» из плакированной стали, применяется ручная дуговая (РДС) и автоматическая сварка под слоем флюса (АДФ). Для сварки узлов используется соединение С-36 ГОСТ16098-80 (рис. 2, а) и постоянный ток обратной полярности.

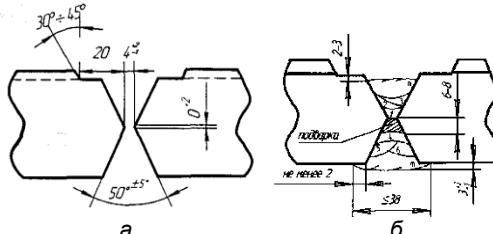


Рис. 2. Узел сварного соединения плакированной стали С-36: а - разделка кромок под сварку [3]; б - конструктивные элементы сварки основного слоя

При автоматической сварке, согласно морскому регистру судоходства, сварку основного слоя PCF36Z, производят проволокой Св-04Н2ГТА (проходы 1-8 рис.2) d<sub>эл</sub>-4мм, флюс рекомендован заводом изготовителем проволоки марки ОК Flux 10.62 производства ESAB GROUP. Сварку начинают с наложения корневого валика, односторонней подварки толщиной 6-8мм, РДС электродами 48-ХН-4 d<sub>эл</sub>-4мм, с последующей механической зачисткой.

Наибольшую трудность представляет сварка перехода от основного слоя PCF36Z к плакированному 316L, так как разбавление этого слоя металлом основного (нелегированного) слоя резко снижает его коррозионные и механические свойства. Поэтому сварку плакированного слоя производят через подслой (рис. 3 а, б) имеющий повышенную степень аустенитности, применяя сварочные проволоки и электроды с повышенным содержанием никеля и хрома, компенсирующим разбавление металла шва основным металлом.

Для сварки высоколегированного подслоя используется проволока Св-07Х25Н12Г2Т (рис. 2 а, б, проходы 9-12), флюс 48ОФ-6М.

Для сварки плакированного слоя применяют проволоку Св-04Х19Н11М3 (рис. 3а, б, проходы 13-19).

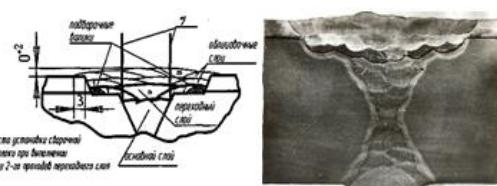


Рис. 3. Сварка высоколегированного подслоя и плакированного слоя: а - схема сварки; б - макроструктура соединения

При общей сборке суперблоков МЛСП «Приразломная» и выполнении монтажных стыков используется ручная дуговая сварка, соединение С-36 ГОСТ16098-80, при постоянном токе обратной полярности.

Сварку основного слоя PCF36Z, производят электродами 48ХН-4 диаметрами 4 и 3 мм (проходы 1-10). Сварка высоколегированного подслоя выполняется электродами ЭА-918/15  $d_{эл} = 4$  мм (проходы 11-14), сварка плакированного слоя ЭА-400/10У (проходы 15-22).

Данная технология имеет ряд недостатков которые значительно затрудняют сварку ледового дефлектора, а именно:

- при сварке переходного слоя от феррито-перлитной стали PCF36Z к austenитной 316L используются глубоко austenитные сварочные материалы, с повышенным содержанием никеля и хрома. На сварку всего соединения требуются сварочные материалы трех видов, что приводит к удорожанию изготовления ледового дефлектора;

- при автоматической и ручной дуговой сварке переходного, плакирующего слоя накладывается 17 и 27 валиков соответственно (рис. 4,а; 5,а), которые при повторяющемся термическом цикле приводят к перегреву стали, активации диффузионных процессов на границе контакта PCF36Z и 316L охрупчивая сварное соединение.

### 1. Разработка технологии сварки с комплексным воздействием на металл сварочной ванны

Используя принцип ресурсосбережения, экономного использования такого дорогостоящего и стратегически важного элемента, такого как никель, разработана новая технология сварки переходного, плакирующего слоя стали PCF36Z+316L с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны, заключающаяся во введении внутренних стоков тепла в виде дополнительной холодной охлаждающей присадки (макрохолодильников) ДХП [2] и поперечных вибрационных колебаниях электрода (рис.4-7).

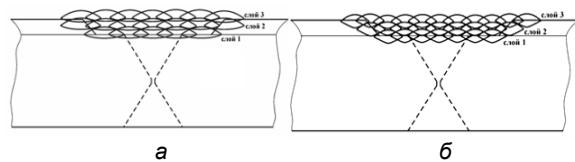


Рис. 4. Схема раскладки валиков сварки переходного (слой 1) и плакирующего (слой 2 и слой 3) слоев при ручной дуговой сварке (РДС): а - РДС обычным способом ( $n_e=27$ ); б - РДС с макрохолодильником ( $M_{макр}=80\div90\%$ ) и вибрацией электрода ( $\omega=4\div5$  Гц,  $A=2$ мм) ( $n_e=19$ )

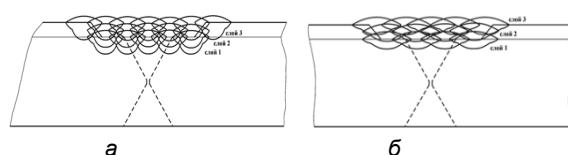


Рис. 5. Схема раскладки валиков сварки переходного (слой 1) и плакирующего (слой 2 и слой 3) слоев при автоматической сварке под слоем флюса (АФ): а - АФ обычным способом ( $n_e=17$ ); б - АФ с макрохолодильником ( $M_{макр}=40\div50\%$ ) и вибрацией электрода ( $\omega=4\div5$  Гц,  $A=2$ мм) ( $n_e=13$ )

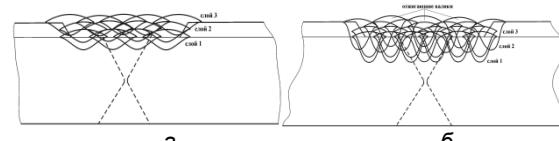


Рис. 6. Схема раскладки валиков сварки переходного (слой 1) и плакирующего (слой 2 и слой 3) слоев при автоматической сварке в среде защитного газа (Ar) (ИП): а - ИП обычным способом ( $n_e=24$ ); б - ИП с макрохолодильником ( $M_{макр}=80\div90\%$ ) и вибрацией электрода ( $\omega=4\div5$  Гц,  $A=2$ мм) ( $n_e=13$ )

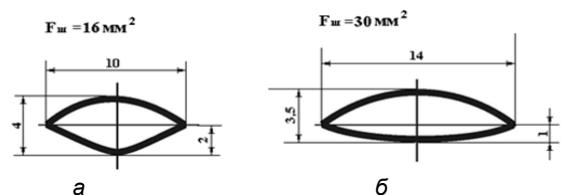


Рис. 7. Изменение геометрических параметров при ручной дуговой сварке (РДС): а - РДС обычным способом; б - РДС с макрохолодильником ( $M_{макр}=80\div90\%$ ) и вибрацией электрода ( $\omega=4\div5$  Гц,  $A=2$ мм)

### 1.1 Ручная дуговая сварка (РДС и РДСк)

В результате анализа экспериментальных данных оптимальный режим РДС сварки с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны приведен в таблице 3.

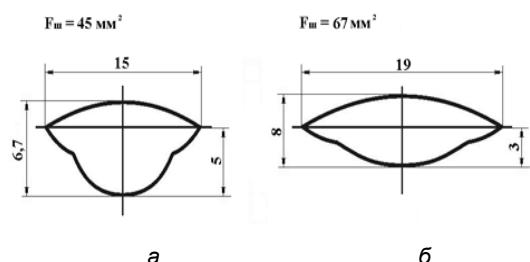


Рис. 8. Изменение геометрических параметров при автоматической сварке под слоем флюса (АФ): а - АФ обычным способом; б - АФ с макрохолодильником ( $M_{макр}=40\div50\%$ ) и вибрацией электрода ( $\omega=4\div5$  Гц,  $A=2$ мм)

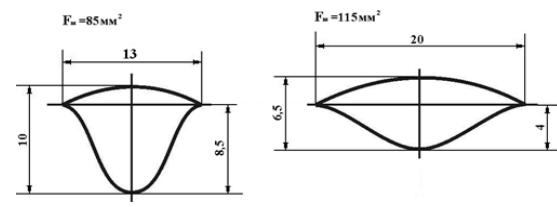


Рис. 9. Изменение геометрических параметров валика при автоматической сварке в среде защитного газа (Ar) (ИП): а - ИП обычным способом; б - ИП с макрохолодильником ( $M_{макр}=80\div90\%$ ) и вибрацией электрода ( $\omega=4\div5$  Гц,  $A=2$ мм)

Оптимальная доля охлаждающей присадки должна быть  $80\div90\%$  от массы электродного стержня ( $M_{макр}=80\div90\%$ , оптимальная поперечная вибрация электрода ( $\omega=4\div5$  Гц,  $A=2$ мм).

Таблица 3

**Режимы РДС переходного, плакирующего слоя стали PCF36Z+316L с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны**

<b>РДС, <math>M_{\text{макр}}=80 \div 90\%</math>, <math>\omega = 4 \div 5 \text{ Гц}</math>, <math>A = 2 \text{ мм}</math> (постоянный ток обратной полярности)</b>					
Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки,	Погонная энергия, кДж/см	Межваликовая температура, $^{\circ}\text{C}$
3,0	90-110	21-22	70	15,1	30
4,0	130-140	22-23	170	8,1	50-60

Применение комплексного способа ручной дуговой сварки позволяет на 48%, увеличить площадь поперечного сечения сварного валика (с  $F_w=16\text{мм}^2$  до  $F_w=30\text{мм}^2$ , рис. 7 а, б). Это позволяет уменьшить количество наложения сварочных валиков с 7 до 5 при сварке переходного слоя и с 20 до 14 при сварке плакирующего слоя (рис. 4. а, б), без увеличения погонной энергии сварки. Использование макрохолодильников в сварочных материалах РДС позволило исключить использование более дорогих электродов ЭА-918/15 при сварке переходного слоя с заменой их на электроды ЭА-400/10У, обеспечивая оптимальную аустенитно-ферритную структуру сварных валиков. Содержание в структуре магнитной фазы составило - 5%.

**Характеристики электродов РДС.** Электрод ЭА-918/15, ЭА-400/10У; покрытие основное; коэффициент наплавки - 12,0 г/А·ч; Производительность наплавки ( $d_{\text{эл}}=4\text{мм}$ ) – 1,6 кг/ч; расход электродов на 1 кг наплавленного металла – 1,8 кг.

**Характеристики электродов с макрохолодильником РДСк.** Применение макрохолодильника ( $M_{\text{макр}} = 80 \div 90\%$ ) с вибрацией ( $\omega = 4 \div 5 \text{ Гц}$ ,  $A = 2 \text{ мм}$ ); электрод ЭА-400/10У, покрытие основное; макрохолодильник – Э-10X17H13M3T (макрохолодильник спиральный  $\varnothing 2\text{мм}$ , с насечкой L-1мм) (рис. 10); коэффициент наплавки - 19,0 г/А·ч; производительность наплавки ( $d_{\text{эл}}=4\text{мм}$ ) – 2,6 кг/ч; расход электродов на 1 кг наплавленного металла – 1,3 кг.

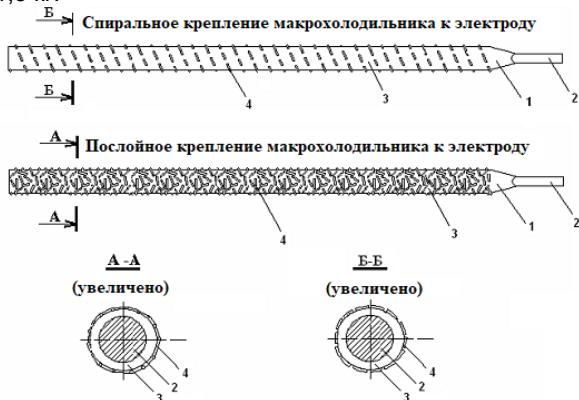


Рис. 10. Электрод с макрохолодильником-1:  
2 - стержень электрода Э-10X17H13M3T;  
3 - обмазка электрода;  
4 - макрохолодильник Э-10X17H13M3T

**1.2 Автоматическая сварка под слоем флюса (АФ и АФк)**

Применение комплексного способа при автоматической сварке под слоем флюса АФк позволяет на 67% увеличить площадь поперечного сечения сварного валика (с  $F_w=45\text{мм}^2$  до  $F_w=67\text{мм}^2$ , рис. 8 а, б). Это позволяет уменьшить количество наложения сварочных валиков с 5 до 4 при сварке переходного слоя и с 12 до 9 при сварке плакирующего слоя (рис. 5. а, б), без увеличения погонной энергии сварки.

Использование макрохолодильников в сварочных материалах АФк позволило исключить использование более дорогой проволоки Св-07Х25Н12Г2Т при сварке переходного слоя с заменой их на проволоку Св-04Х19Н11М3, обеспечивая аустенитно-ферритную структуру сварных валиков. Содержание в структуре магнитной фазы составило 10%.

Таблица 4  
**Режимы АФк переходного, плакирующего слоя стали PCF36Z+316L с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны**

<b>АФк, <math>M_{\text{макр}}=40 \div 50\%</math>, <math>\omega = 4 \div 5 \text{ Гц}</math>, <math>A = 2 \text{ мм}</math> (постоянный ток обратной полярности)</b>					
Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, см/мин	Погонная энергия, кДж/см	Межваликовая температура, $^{\circ}\text{C}$
4,0	440-460	27-29	50-54	12,4	23

**Характеристики процесса АФ** сварки: проволока  $d_{\text{эл}}=4\text{мм}$  Св-07Х25Н12Г2Т, Св-04Х19Н11М3, коэффициент наплавки - 14-16 г/А·ч.

**Характеристики процесса АФк** с макрохолодильником ( $M_{\text{макр}}=40 \div 50\%$ ) и вибрацией электродной проволоки ( $\omega = 4 \div 5 \text{ Гц}$ ,  $A = 2 \text{ мм}$ ): проволока Св-04Х19Н11М3, макрохолодильник Св-04Х19Н11М3 рубленый  $\varnothing 2\text{мм}$  L - 2 мм, во флюсе, коэффициент наплавки – 22,5 г/А·ч.

В результате анализа экспериментальных данных оптимальный режим АФк сварки с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны приведен в таблице 4.

**1.3 Автоматическая сварка в защитном газе (ИП и ИПк)**

Режимы автоматической сварки в среде защитного газа переходного и плакирующего слоя с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны приведены в таблице 5.

**Таблица 5**  
**Режимы ИПк переходного, плакирующего слоя**  
**стали PCF36Z+316L с комплексным воздействием**  
**на жидкий металл сварочной ванны**

<b>ИПк(Ar), M<sub>макр</sub>=80÷90% + ω = 4÷5 Гц, A= 2 мм (постоянный ток, обратной полярности)</b>					
Диаметр электрода,мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, см/мин	Вылет электрода, мм	Расход газа л/мин
3,0	350-400	22-23	40-45	25-40	40-45
4,0	400-450	23-26	50-54	25-40	40-45

Применение комплексного способа при автоматической сварке в среде защитного газа позволяет на 27% увеличить площадь поперечного сечения сварного валика (с  $F_w=85\text{мм}^2$  до  $F_w=115\text{мм}^2$ , рис. 9 а, б). Это позволяет уменьшить количество наложения сварочных валиков с 7 до 4 при сварке переходного слоя и с 17 до 9 при сварке плакирующего слоя (рис. 6 а и б), без увеличения погонной энергии сварки. Использование макрохолодильников в сварочных материалах ИП позволило исключить использование более дорогой проволоки Св-07Х25Н12Г2Т при сварке переходного слоя с заменой их на проволоку Св-04Х19Н11М3, обеспечивая аустенитно-ферритную структуру сварных валиков. Содержание в структуре составило магнитной фазы- 7%.

**Характеристики процесса ИП (Ar) сварки:** проволока Св-07Х25Н12Г2Т  $d_{эл} = 4$  мм, Св-04Х19Н11М3, коэффициент наплавки - 14 г/А·ч.

**Характеристики процесса ИПк (Ar)** с макрохолодильником ( $M_{макр}=80÷90\%$ ) и вибрацией электродной проволоки ( $\omega = 4÷5$  Гц,  $A= 2$  мм): проволока Св-04Х19Н11М3, макрохолодильник Св-04Х19Н11М3 Ø2мм, в процессе сварки подается в

виде дополнительной холодной присадки (ДХП) в хвостовую часть шва из дополнительной бухты, коэффициент наплавки – 26,6 г/А·ч.

### Заключение

На образование сварного соединения тратится только четверть от общей теплоты дуги, а большая его часть расходуется на перегрев сварочной ванны, нагрев изделия, его деформацию, диффузию химических элементов между слоями, что приводит к ухудшению свойств сварного соединения плакированной стали.

Решая эту проблему, была разработана и исследована оптимальная комплексная технология дуговой сварки переходного и плакирующего слоя двухслойной стали PCF36Z+316L с макрохолодильником и низкочастотной вибрацией электрода, позволяющая рационально использовать всю теплоту сварочной дуги, получать качественные соединения.

Использование комплексного способа дуговой сварки позволяет, увеличить площадь поперечного сечения сварного валика тем самым уменьшить количество проходов и тепловое воздействие на сталь при формировании соединения, без увеличения погонной энергии сварки.

Применение макрохолодильников дает возможность исключить использование дорогих электродов (с высокой степенью аустенитности) при сварке переходного слоя с заменой их на экономнолегированные по хрому и никелю электроды, обеспечивая качественную, аустенитно-ферритную структуру сварных валиков.

Сварные соединения, полученные дуговой сваркой с макрохолодильником и низкочастотной вибрацией электродной проволоки, характеризуются:

- повышенной стойкостью против образования холодных и горячих трещин;
- высоким уровнем механических свойств.

### Литература

1. Правила классификации и постройки судов. Том 2. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2003. - 619 с.
2. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин; под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 487 с.
3. ГОСТ 16098–80. Соединения сварные из двухслойной коррозионностойкой стали. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 89 с.
4. ГОСТ 10885–85. Сталь листовая горячекатанная двухслойная коррозионностойкая. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 155 с.
5. Многослойная сталь в сварных конструкциях / Б. Е. Патон [и др.]; под ред. акад. Б. Е. Патона и акад. АН УССР Б. И. Медовара; Ин-т электросварки им. Е. О. Патона АН УССР. - К: Наукова думка, 1984. - 288 с.
6. Сварка разнородных сталей: Выбор электродов, режимов подогрева и отпуска: Справ. пособие / И. А. Закс. – Л.: Машиностроение. 1973. - 208 с.

### References

1. Pravila klassifikatsii i postroyki sudov. [Rules of classification and construction of ships] Tom 2. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Sankt-Peterburg, 2003. 619 s.
2. Teoriya svarivaemosti staley i splavorov [Theory of weldability of metals and alloys] E. L. Makarov, B. F. Yakushin; pod red. E. L. Makarova. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2014. 487 s.
3. GOST 16098–80. Soedineniya svarynye iz dvukhsloynoy korroziyonnostoykoy stali. Osnovnye tipy, konstruktivnye elementy i razmery [Welded joints made of double-layer corrosion-resistant steel. Main types, structural elements and dimensions]. M.: Izd-vo standartov, 1982. 89 s.

4. GOST 10885–85. Stal' listovaya goryachekatannaya dvukhsloynaya korrozionnostoykaya. Tekhnicheskie usloviya [Hot-rolled double-layer sheet steel is corrosion-resistant. Technical conditions.]. M.: Izd-vo standartov, 1986. – 155 s.
5. Mnogosloynaya stal' v svarykh konstruktsiyakh [Multilayer steel in welded structures]. B. E. Paton [i dr.]; pod red. akad. B. E. Patona i akad. AN USSR B. I. Medovara; In-t elektrosvarki im. E. O. Patona AN USSR. K: Naukova dumka, 1984. 288 s.
6. Svarka raznorodnykh stalej: Vybor elektrodov, rezhimov podogreva i otpuska [Welding of dissimilar steels]: Sprav. posobie. I. A. Zaks. L.: Mashinostroenie. 1973. 208 s.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Гальцов Игорь Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и машиностроения, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, 164500, Северодвинск, Архангельская область, улица Капитана Воронина, 6, e-mail: i.galjcov@narfu.ru

**Евгений Владимирович Фомин**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии металлов и машиностроения, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, 164500, Северодвинск, Архангельская область, улица Капитана Воронина, 6, e-mail: e.fomin@narfu.ru

**Igor A. Galjcov**, PhD (Eng), assistant professor of metal technology and mechanical engineering, Northern (Arctic) Federal University, Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk, Arkhangelsk region, 164500, Russian Federation, e-mail: i.galjcov@narfu.ru

**Evgeny V. Fomin**, PhD (Eng), assistant professor, head of department of metal technology and mechanical engineering, Northern (Arctic) Federal University, Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk, Arkhangelsk region, 164500, Russian Federation e-mail: e.fomin@narfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 02.02.2022.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 31.03.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2022.

**Научная статья**

УДК 629.5.083.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.007>

## Применение мобильных устройств магнитного типа для очистки поверхностей корпусов судов

С.И. Корягин<sup>1</sup> skoryagin@kantiana.ru, Н.Л. Великанов<sup>1</sup> e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,

О.В. Шарков<sup>1</sup> e-mail: osharkov@kantiana.ru

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

**Аннотация.** Необходимость поддержания лакокрасочного покрытия корпуса судна в работоспособном состоянии, отсутствия на нем слоев пыли, грязи, продуктов обрастания в подводной части выдвигает как актуальную задачу автоматизации очистки корпуса. Корпус имеет поверхность сложной переменной пространственной кривизны, не выражаящейся аналитически. Для работы в таких условиях хорошо подходят мобильные устройства магнитного типа. Само устройство представляет собой платформу, установленную на две тележки. Тележки имеют колесную базу, крепятся к платформе посредством шарниров. Целью работы являлось выявление критериев подбора характеристик мобильных устройств, разработка расчетных зависимостей для определения числовых значений этих характеристик. Наиболее значимыми показателями корпуса судна являются радиус кривизны и размер выступов (неровностей) на поверхности. Для тележек и платформ таким показателем является зазор – расстояние между поверхностями тележки и корпуса судна. В работе получены математические модели связей кривизны поверхности и зазоров, представлены графические зависимости. Результаты можно использовать при проектировании и разработке технологий систем очистки корпусов морских судов.

**Ключевые слова:** мобильное устройство, радиус кривизны обшивки судна, поверхность корпуса судна, очистка судна.

**Для цитирования:** Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Применение мобильных устройств магнитного типа для очистки поверхностей корпусов судов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 57—63.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.007>

## The use of mobile devices of magnetic type for cleaning the surfaces of ship hulls

Sergey I. Koryagin<sup>1</sup> skoryagin@kantiana.ru, Nikolay L. Velikanov<sup>1</sup> e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,

Oleg V. Sharkov<sup>1</sup> e-mail: osharkov@kantiana.ru

<sup>1</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University

**Abstract.** The need to maintain the paintwork of the hull in working condition, the absence of layers of dust, dirt, fouling products in the underwater part puts forward as an urgent task of automating the cleaning of the hull. The housing has a surface of complex variable spatial curvature that is not expressed analytically. Magnetic-type mobile devices are well suited to work in such conditions. The device itself is a platform mounted on two trolleys. The trolleys have a wheelbase and are attached to the platform by means of hinges. The purpose of the work was to identify criteria for the selection of characteristics of mobile devices, the development of computational dependencies for determining the numerical values of these characteristics. The most significant indicators of the vessel's hull are the radius of curvature and the size of protrusions (irregularities) on the surface. For trolleys and platforms, such an indicator is the gap - the distance between the surfaces of the trolley and the hull of the vessel. Mathematical models of the relations of the curvature of the surface and the gaps are obtained, graphical dependencies are presented. The results can be used in the design and development of technologies for cleaning the hulls of ships.

**Key words:** mobile device, curvature radius of ship skin, surface of ship hull, ship cleaning.

**For citation:** Sergey I. Koryagin, Nikolay L. Velikanov, Oleg V. Sharkov, The use of mobile devices of magnetic type for cleaning the surfaces of ship hulls, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 57—63.

### Введение

В процессе эксплуатации обшивка корпуса судна повреждается воздействием различных повреждающих факторов: обрастанию [1–5]; коррозионному износу [5–9]; отслоению краски [3] и др.

Вследствие этого возникает необходимость регулярной очистки корпуса судна. Целью очистки является удаление обрастаний и других наслойений, увеличивающих шероховатость и снижающих скорость хода судна, создание условий для нанесения нового полимерного или лакокрасочного

покрытия, обеспечивающего отсутствие коррозионного процесса под ним [5, 10].

Следует отметить, что основной объем работы по очистке приходится на подводную часть судна, подверженную обрастанию, коррозии и нарушению полимерного или лакокрасочного покрытия [5].

Повысить эффективность и снизить материально-временные затраты в процессе очистки корпуса судна позволяет применение различных средств механизации [10–14].

К таким средствам можно отнести мобильные устройства магнитного типа, движущиеся по корпусу судна с использованием магнитов [10, 11].

Среди них наиболее универсальными являются мобильные устройства на колесной базе [15]. Они могут перемещать оборудование для очистки как надводной, так и подводной части корпуса судна.

В данной статье рассматриваются вопросы перемещения мобильных устройств колесного типа по поверхности корпуса судна с неровностями, что происходит в процессе очистки последнего.

### **1. Анализ вопроса применения мобильных устройств магнитного типа при очистке корпусов судов**

При проведении очистки корпусов судов удалению подлежат любые обрастанья (слизы, водоросли, морские желуди и мшанки, балансиры), рыхлые слои продуктов коррозии, остатки старой, непрочно держащейся краски и по мере необходимости и экономической целесообразности многослойные старые полимерные или лакокрасочные покрытия.

По принципу воздействия очистку металлических поверхностей корпуса судна можно разделить на четыре способа:

1. механический (щетки или шарошки с электрическим или пневматическим приводом, отбойные молотки, скребки);
2. термический (газопламенный, электрические щетки);
3. химический (травильные пасты, кислоты);
4. эрозионный (пескоструйный, гидравлический, гидропескоструйный, дробеструйный).

Кроме перечисленных способов очистки возможно использование ультразвука, электрохимического (электролитическое травление) и электрогидравлического (при электрическом разряде между электродом и корпусом судна образуется ударная волна) способов.

При механическом способе очистки применяют проволочные щетки, скребки, отбойные молотки, барабаны с набором насаженных стальных закаленных шарошек, приводимые в движение от электро-, гидро- или пневмоприводов. При этом имеющиеся на корпусе наслаждения подвергаются срезанию, ударам, соскабливанию, царапанию и рыхлению.

Очистным органом щеточного типа удаляют обрастанья, высохшие слои рыхлой ржавчины и непрочно держащейся краски. При применении очистных органов с шарошками удается раздробить самые плотные слои ржавчины, однако они малоэффективны при наличии на корпусе рыхлой ржавчины и, кроме того, при их работе создается повышенный уровень шума. Поэтому обычно используют комбинацию щеток и шарошек в одном очистном органе.

Перемещение оборудования для очистки корпуса судна наиболее эффективно осуществлять с использованием специальных мобильных устройств магнитного типа на колесной базе.

В настоящее время имеется положительный опыт практического применения мобильных устройств магнитного типа, предназначенных для осмотра и очистки корпуса судна, как в нашей стране [16, 17], так и за рубежом [18–20]. На рис. 1 показан процесс очистки корпуса судна с использованием роботизированной системы Hismar, созданной на

базе колесного мобильного устройства магнитного типа.

Грузоподъемность таких устройств обычно лежит в пределах 50...100 кг, поэтому при установке на него того или иного рабочего инструмента необходимо учитывать его массу.

Кроме того, должны учитываться такие факторы, как вибрация рабочих инструментов (например, реакция струи при гидроочистке, которая будет передаваться на мобильное устройство) и др.

При установке очистных органов на мобильное устройство наиболее рекомендуемыми являются: пистолет гидроструйной очистки, шарошечный барабан, для подводной очистки капроновая или мягкая стальная щетка.



Рис. 1. Очистка корпуса судна с использованием мобильное устройство типа Hismar [21].

Экономическая эффективность и повышение производительности при использовании гидроструйной очистки очевидны, так как отсутствуют перерывы в работе операторов, также улучшаются условия его работы за счет использования дистанционного управления устройством и очисткой. Таким образом, качественно изменяются функции оператора, которые в этом случае сводятся к управлению механизмами.

Использование шарошечных барабанов с пневмо- или электроприводом встречает определенные трудности, связанные с повышенной вибрацией барабана, и как следствие – низкий коэффициент сцепления между ведущими колесами мобильного устройства и бортовой обшивкой, который также снижается за счет попадания под ведущие колеса продуктов очистки.

В этом случае возможным техническим решением является использование мобильного устройства гусеничного типа или применение внешнего привода для перемещения устройства.

Для проведения очистки также возможно использование щеток. Однако эффективность очистки с помощью щеток очень низкая, и их использование оправдано только при проведении подводной очистки для удаления с бортовой обшивки обрастаний и непрочно держащихся субстанций без повреждений лакокрасочного покрытия.

Проведение такой очистки очень эффективно для судов, работающих в теплых морях, где обрастанье развивается интенсивно и значительно влияет на скорости хода судна.

В настоящее время во многих портах производится подводная очистка капроновыми щетками с гидроприводом с привлечением для работ водолазов. Использование мобильных устройств

магнитного типа для проведения подводной очистки позволит увеличить эффективность эксплуатации флота.

## 2. Влияние неровностей корпуса судна на конструктивные особенности мобильных устройств

Как было показано в работе [15] для проведения различных работ, связанных с техническим обслуживанием корпуса судна, наиболее эффективным является конструктивная компоновка мобильного устройства магнитного типа, представляющее собой платформу, на которой шарнирно закреплены две тележки колесной базы (рис.2).

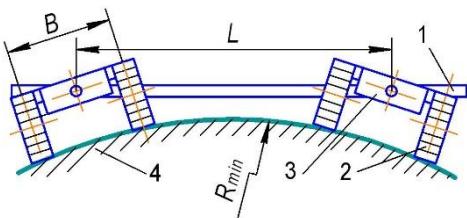


Рис. 2. Компоновочная схема мобильного устройства:  
1 – платформа; 2 – колесная тележка;  
3 – электромагнит; 4 – опорная поверхность.

Для данной конструктивной компоновки были получены формулы для определения текущего значения зазора  $\Delta$  между устройством и корпусом судна и минимального радиуса кривизны  $R_{min}$  корпуса судна, при которой мобильное устройство может нормально передвигаться [15]:

Расчетная схема для определения радиуса кривизны, допускающего движение мобильного устройства, приведена на рис. 3.

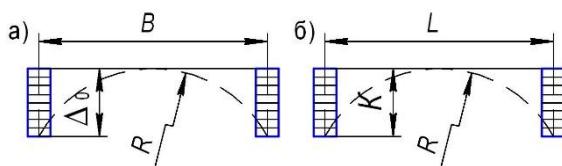


Рис.3. Расчетная схема: а) – колесной тележки; б) – платформы.

Для рассмотренных случаев начальные величины зазора и клиренса можно определить из следующих соотношений [22]:

$$\Delta_0 = R - \sqrt{R^2 - \frac{B^2}{4}} ; \quad (1)$$

$$K = R - \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} , \quad (2)$$

где  $B$  – колея колесной тележки;  $L$  – колея платформы;  $R$  – радиус кривизны опорной поверхности;  $\Delta_0$  – начальный и текущий зазоров между устройством и корпусом судна.

Из соотношений (1) и (2) можно определить величины минимального радиуса кривизны, необходимый для передвижения колесной тележки и платформы соответственно по выражениям:

$$R1_{min} = \frac{B^2}{8\Delta_0} + \frac{\Delta_0}{2} ; \quad (3)$$

$$R2_{min} = \frac{L^2}{8\Delta_0} + \frac{\Delta_0}{2} . \quad (4)$$

Зависимости (3) и (4) получены в предположении, что поверхность корпусной обшивки судна является гладкой.

На практике корпус судна имеет различные неровности – сварные швы, заклепки, наросты и др.. Такие неровности могут встречаться как на выпуклой, так и вогнутой поверхности корпуса.

Особенно большое количество неровностей встречается на пути мобильного устройства в процессе операции очистки корпуса судна.

Перепишем формулу (3) с учетом преодоления мобильным устройством неровности как:

$$R1_{min} = \frac{B^2}{8(\Delta_0 - \delta)} + \frac{\Delta_0 - \delta}{2} \approx \frac{B^2}{8(\Delta_0 - \delta)} , \quad (5)$$

где  $\delta$  – высота неровностей корпуса судна.

Выражение (5) характеризует минимальный радиус кривизны поверхности, преодолеваемый колесной тележкой мобильного устройства.

Минимальный радиус кривизны поверхности, преодолеваемый платформой мобильного устройства равен:

$$R2_{min} = \frac{L^2}{8(K - \delta)} + \frac{K - \delta}{2} \approx \frac{L^2}{8(K - \delta)} . \quad (6)$$

Таким образом для обеспечения свободного перемещения мобильного устройства радиус кривизны на любом участке поверхности корпуса судна  $R$  должен быть больше его минимально допустимых величин ( $R \geq [R1_{min}, R2_{min}]$ ).

Так как зазор  $\Delta_0$  является определяющим, то необходимо выполнить условие, чтобы минимальный радиус кривизны транспортного устройства был равен или меньше минимального радиуса кривизны тележки:

$$\frac{L^2}{8(K - \delta)} \leq \frac{B^2}{8(\Delta_0 - \delta)} . \quad (7)$$

Решение выражения (7) относительно клиренса мобильного устройства дает:

$$K = (\Delta_0 - \delta) \frac{L^2}{B^2} + \delta . \quad (8)$$

Таким образом, на проходимость мобильного устройства влияют его колея, колея тележки, зазор между магнитом и опорной поверхностью, клиренс, высота неровностей опорной поверхности.

При изменении кривизны опорной поверхности изменяется рабочий зазор между последней и магнитом, следовательно, изменяется сила притяжения. Вогнутая кривизна опорной поверхности увеличивает рабочий зазор, что приводит к уменьшению силы притяжения, выпуклая уменьшает зазор, что приводит к увеличению силы притяжения.

Другими словами, при движении мобильного устройства по опорной криволинейной поверхности сила притяжения изменяется от точки к точке и носит случайный характер. Это обстоятельство требует стабилизации силы притяжения, что возможно осуществить двумя методами: регулированием тока

возбуждения электромагнитов или регулированием рабочего зазора путем перемещения магнита относительно опорной поверхности при движении мобильного устройства.

Зазор  $\Delta_0$  должен быть больше максимальной высоты  $\delta_{max}$  преодолеваемых неровностей и обычно принимается  $\Delta_0 = \delta_{max}$ .

Минимальный радиус кривизны транспортного устройства в продольном направлении обычно меньше, чем в поперечном и определяется выражением

$$R_{min} = \frac{A^2}{8(K - \delta)}, \quad (7)$$

где  $A$  – продольная база мобильного устройства.

Так как тележка подвешена к платформе мобильного устройства шарнирно, то наиболее удобным и конструктивным является размещение тягового электродвигателя и редуктора на этой тележке. Выполнение тележек устройства в виде законченного конструктивного модуля позволяет обеспечить их взаимозаменяемость и использование для построения мобильных устройств с различными главными размерами.

Сила притяжения электромагнита, перераспределяется между обоими колесами тележки. Для обеспечения максимальной силы сцепления между колесами и опорной поверхностью необходимо, чтобы врачающий момент от тягового электродвигателя передавался обоим ведущим колесам. Это обеспечивается дифференциальной передачей или жесткой связью колес.

Применение дифференциальной передачи от тягового электродвигателя к ведущим колесам дает возможность обеспечить их движение без скольжения в случаях поворота транспортного устройства. Однако такая передача имеет сложное конструктивное исполнение и увеличивает массу тележки. При жесткой связи между колесами не всегда имеет место их чистое качение по опорной поверхности, когда одно устройство юзует, а другое буксует. Это приводит к некоторому снижению коэффициента сцепления, однако простота конструкции жесткого крепления колес в тележке между собой имеет определяющее значение.

Так как левая и правая тележки подвешены к платформе мобильного устройства шарнирно, то для устойчивости платформы устройства относительно опорной поверхности необходимо иметь третью точку опоры, в качестве которой можно установить колесо, вращающееся с эксцентрикситетом вокруг оси крепления. Для обеспечения нагрузки от этого колеса на опорную поверхность можно использовать электромагнит или пружинную рейку, установленную на противоположной этому колесу стороне.

Предварительный изгиб пружинной рейки должен быть рассчитан на минимальный радиус кривизны выпуклой опорной поверхности, по которой перемещается мобильное устройство. Следует иметь в виду, что усилие от пружинной рейки противодействует силам притяжения электромагнитов и имеет максимальное значение на вогнутой опорной поверхности минимального радиуса кривизны. Поэтому усилие от пружинной рейки должно быть выбрано минимальным, чтобы

обеспечить только стабилизацию платформы устройства на произвольно ориентированной в пространстве опорной поверхности.

Естественно, что в этом случае центр тяжести полезного перевозимого груза не должен быть смещен в сторону пружинной рейки или в сторону третьей опорной точки и должен находиться на оси симметрии крепления тележек к платформе.

При нахождении мобильного устройства на вертикальной поверхности на шарнирно подвешенные тележки действуют опрокидывающие моменты, вызываемые силой тяжести устройства и боковой силой сцепления при его разворотах.

Для уменьшения этих моментов и повышения устойчивости тележки от опрокидывания точку ее крепления к платформе устройства необходимо понижать, приближая ее к опорной поверхности.

### 3. Результаты расчетов и дискуссия

На основании полученных зависимостей (3)–(7) выполнены расчеты, показывающие влияние характеристик поверхности обшивки корпуса судна и конструктивных параметров мобильного устройства на его проходимость.

Для расчеты принимали следующие параметры: колея мобильного устройства  $L = 0,5 \dots 1,5$  м; колея колесной тележки  $B = 0,15 \dots 0,45$  м; клиренс  $K = 0,1$  м; начальный зазор  $\Delta_0 = 0,05$  м; высота неровностей  $\delta = 0,01 \dots 0,04$  м.

На рис. 4 и 5 показаны влияние высоты неровностей корпуса судна и конструктивных характеристик мобильного устройства на требуемый минимальный радиус кривизны, необходимый для движения мобильного устройства (платформы) и колесной тележки.

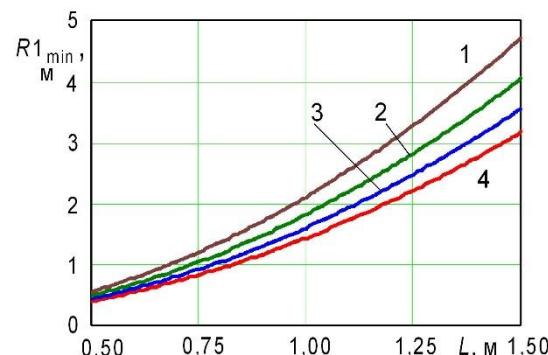


Рис. 4. Изменение минимального радиуса кривизны, необходимого для движения платформы: 1 –  $\delta = 0,04$  м; 2 –  $\delta = 0,03$  м; 3 –  $\delta = 0,02$  м; 4 –  $\delta = 0,01$  м.

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении колеи мобильного устройства с 0,5 до 1,5 м (в 3,0 раза) минимальный радиус нелинейно увеличивается в 5,7...6,2 раза. При этом увеличение высоты неровностей поверхности с 0,01 до 0,04 м (в 4 раза) приводит увеличению требуемого радиуса кривизны в среднем в 3,9 раза.

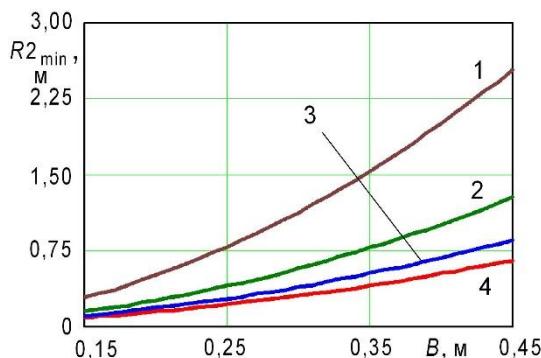


Рис. 5. Изменение минимального радиуса кривизны, необходимого для движения тележки: 1 –  $\delta=0,04 м$ ; 2 –  $\delta=0,03 м$ ; 3 –  $\delta=0,02 м$ ; 4 –  $\delta=0,01 м$ .

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении колеи тележки с 0,15 до 0,45 м (в 3,0 раза) минимальный радиус непрерывно увеличивается в 7,3...8,5 раза. При этом увеличение высоты неровностей поверхности с 0,01 до 0,04 м (в 4 раза) приводит увеличению требуемого радиуса кривизны в среднем в 1,5 раза.

На рис. 6 приведено сравнение минимальных радиусов кривизны, требуемых для движения колесной тележки и платформы.

Как видно из полученных результатов на всем диапазоне изменения колеи мобильного устройства требуемый минимальный радиус кривизны, обеспечивающий перемещение мобильного устройства больше в 4,1...4,4 раза, чем для перемещения колесной тележки.

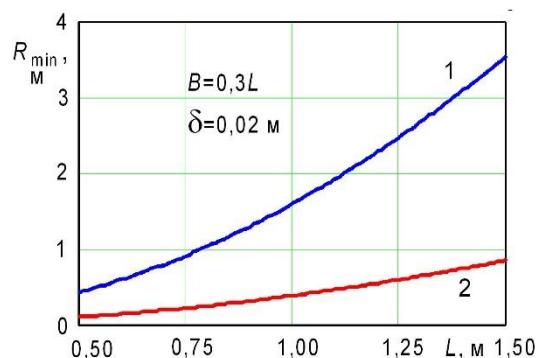


Рис. 6. Изменение минимального радиуса кривизны, необходимого для перемещения: 1 – платформы; 2 – колесной тележки.

### Заключение

Проведен анализ работы мобильных устройств магнитного типа, состоящего из платформы с шарнирно закрепленными на ней двумя колесными тележками, передвигающимся по криволинейной поверхности.

Установлено, что минимальные зазоры для платформы и тележек являются факторами, обеспечивающими возможность перемещения устройства. Величины зазоров зависят от радиуса кривизны поверхности.

Результаты могут быть полезны при проектировании мобильных устройств магнитного типа, используемых в процессе очистки корпусов судов.

### Литература

1. Song S., Demirel Y.K., Muscat-Fenech C.D.M., Tezdogan T., Atlar M. Fouling effect on the resistance of different ship types // Ocean engineering. 2020. V.216. 107736.
2. Омельянюк М.В. Очистка гидротехнических сооружений и плавсредств от обрастаний и наслойений // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. №2. С. 45-48.
3. Федоровский К.Ю., Федоровская Н.К., Ениватов В.В., Бурков Д.В. Влияние покраски и биообрастания корпуса судна на теплоотвод замкнутой системы охлаждения энергоустановки // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2021. №1. С. 61-70.
4. Выхристюк П.Н., Якубенко А.Р. Комплексная система защиты от коррозии и обрастания судов // Судостроение. 2001. №5. С. 51.
5. Зобачев Ю.Е., Соминская Э.В. Защита судов от коррозии и обрастания. Москва: Транспорт, 1984. 175 с.
6. Van T.V., Yang P. Effect of corrosion on the ship hull of a double hull very large crude oil carrier // Journal of marine science and application. 2017. V.16(3). Рр. 334-343.
7. Lampe J., Hamann R. Probabilistic model for corrosion degradation of tanker and bulk carrier // Marine structures. 2018. V.61. Рр. 309-325.
8. Бурнашева Н.В., Кудрин М.А. Влияние коррозионного износа на прочность корпусных конструкций морских судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. №4(394). С. 76-81.
9. Иванова О.А., Родькина А.В. Влияние различных факторов на коррозию конструктивных элементов плавучих сооружений в морской воде // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2018. №56. С. 41-49.
10. Song C., Cui W. Review of underwater ship hull cleaning technologies // Journal of marine science and application. 2020. V.19. Рр. 415-429.
11. Lee M.H., Lee K.S., Park W.C., Lee S.H., Hong S., Park H.G., Choi J.W., Chun H.H. On the synthesis of an underwater ship hull cleaning robot system // International journal of precision engineering and manufacturing. 2012. V.13(11). Рр. 1965-1973.
12. Арабян Л.К., Авотин А.С., Батаева З.Б., Кузьмин В.И. Эффективный метод очистки конструкций корпусов судов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2016. №1-2. С. 63-65.
13. Пелешенко В.А. Особенности и способы автоматизированной борьбы с обрастанием корпусов рыбопромысловых судов // Рыбное хозяйство. 2021. №5. С. 114-117.
14. Xu Z.Y., Xie Y., Zhang K., Hu Y.Q., Zhu X.P., Shi H. Design and optimization of a magnetic wheel for a grit-blasting robot for use on ship hulls // Robotica. 2017. V.35(3). Рр. 712–728.

15. Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Оценка технического состояния корпусов судов с использованием мобильных устройств магнитного типа // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №4-3(45). С. 37–42.
16. Мунасыпов Р.А., Шахмаметьев Т.Р., Москвичев С.С., Слетнев П.В., Мешков И.В. Роботизированная платформа высокой мобильности для задач диагностики элементов судовых конструкций // Экстремальная робототехника. 2016. Т.1. №1. С. 389–393.
17. Сырых Н.В., Чашухин В.Г. Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами. Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. №5. С. 163–173.
18. Hachicha S., Zaoui C., Dallagi H., Nejim S., Maalej A. Innovative design of an underwater cleaning robot with a two arm manipulator for hull cleaning // Ocean Engineering. 2019. V.181. Pp. 303–313.
19. Akinfiev T., Januševskis A., Lavendelis E. A brief survey of ship hull cleaning devices // Transport and Engineering. 2007. V.24(1). Pp. 133-145.
20. Tas Global commercialises robot system for hull cleaning [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ship-technology.com/news/tas-global-robot-system/> (дата обращения: 04.05.2022).
21. Balashov V.S., Gromov B.A., Ermolov I.L., Roskilly A.P. Cleaning by means of the Hismar autonomous robot // Russian engineering research. 2011. V.31(6). Pp. 589-592.
22. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы. СанктПетербург: Лань, 2003. 831 с.

### References

1. Song S., Demirel Y.K., Muscat-Fenech C.D.M., Tezdogan T., Atlar M. Fouling effect on the resistance of different ship types. Ocean engineering. 2020. V.216. 107736.
2. Omelianuk M.V. Ochistka gidrotehnicheskikh sooruzhenij i plavstredstv ot obrastanij i nasloenij [Cleaning of hydraulic structures and watercraft from fouling and layering] Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse. 2009. No2. Pp. 45-48.
3. Fedorovsky K.Yu., Fedorovskaya N.K., Enivatov V.V., Burkov D.V. Vlijanie pokraski i bioobrastanija korpusa sudna na teplootvod zamknutoj sistemy ohlazhdelenija jenergoustanovki [The effect of painting and biofouling of the ship's hull on the heat sink of the closed cooling system of the power plant] Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tehnologicheskogo universiteta. 2021.No1. Pp. 61-70.
4. Vykhristyuk P.N., Yakubenko A.R. Kompleksnaja sistema zashhhity ot korrozii i obrastanija sudov [Comprehensive system of protection against corrosion and fouling of ships] Sudostroenie. 2001. No5. Pp. 51.
5. Zobachev Yu.E., Sominskaya E.V. Zashhita sudov ot korrozii i obrastanija [Protection of ships from corrosion and fouling] Moskva: Transport, 1984. 175 p.
6. Van T.V., Yang P. Effect of corrosion on the ship hull of a double hull very large crude oil carrier. Journal of marine science and application. 2017. V.16(3). Pp. 334-343.
7. Lampe J., Hamann R. Probabilistic model for corrosion degradation of tanker and bulk carrier. Marine structures. 2018. V.61. Pp. 309-325.
8. Burnasheva N.V., Kudrin M.A. Vlijanie korrozionnogo iznosa na prochnost' korpusnyh konstrukcij morskikh sudov [Effect of corrosion wear on the strength of hull structures of marine vessels] Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2020. No4(394). Pp. 76-81.
9. Ivanova O.A., Rodkina A.V. Vlijanie razlichnyh faktorov na korroziju konstruktivnyh jelementov plavuchih sooruzhenij v morskoj vode [Influence of various factors on corrosion of structural elements of floating structures in seawater] Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. 2018. No56. Pp. 41-49.
10. Song C., Cui W. Review of underwater ship hull cleaning technologies. Journal of marine science and application. 2020. V.19. Pp. 415-429.
11. Lee M.H., Lee K.S., Park W.C., Lee S.H., Hong S., Park H.G., Choi J.W., Chun H.H. On the synthesis of an underwater ship hull cleaning robot system. International journal of precision engineering and manufacturing. 2012. V.13(11). Pp. 1965-1973.
12. Arabyan L.K., Avotin A.S., Bataeva Z.B., Kuzmin V.I. Jeffektivnyj metod ochistki konstrukcij korpusov sudov [An effective method of cleaning ship hull structures] Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2016. No1-2. Pp. 63-65.
13. Peleshenko V.A. Osobennosti i sposoby avtomatizirovannoj bor'by s obrastaniem korpusov rybopromyslovyh sudov [Features and methods of automated control of fouling of hulls of fishing vessels] Rybnoe hozjajstvo. 2021. No5. Pp. 114-117.
14. Xu Z.Y., Xie Y., Zhang K., Hu Y.Q., Zhu X.P., Shi H. Design and optimization of a magnetic wheel for a grit-blasting robot for use on ship hulls. Robotica. 2017. V.35(3). Pp. 712-728.
15. Koryagin S.I., Velikanov N.L., Sharkov O.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya korpusov sudov s ispol'zovaniem mobil'nykh ustroystv magnitnogo tipa [Assessment of the technical condition of ship hulls using mobile magnetic devices] Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. No4-1(54). Pp. 37-42.
16. Munasypov R.A., Shakhmamet'yev T.R., Moskvichev S.S., Sletnev P.V., Meshkov I.V. Robotizirovannaya platforma vysokoy mobil'nosti dlya zadach diagnostiki elementov sudovykh konstruktsiy [A highly mobile robotic platform for the tasks of diagnosing elements of ship structures] Ekstremal'naya robototekhnika. 2016. V.1. No1. Pp. 389–393.
17. Syrykh N.V., Chashchukhin V.G. Roboty vertikal'nogo peremeshcheniya s kontaktymi ustroystvami na osnove postoyannykh magniton: konstruktsii i printsipy upravleniya kontaktymi ustroystvami [Robots of vertical movement with contact devices based on permanent magnets: designs and principles of control of contact devices.]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2019.No5. Pp. 163–173.

18. Hachicha S., Zaoui C., Dallagi H., Nejim S., Maalej A. Innovative design of an underwater cleaning robot with a two arm manipulator for hull cleaning. *Ocean Engineering*. 2019. V.181. Pp. 303–313.
19. Akinfiev T., Januševskis A., Lavendelis E. A brief survey of ship hull cleaning devices. *Transport and Engineering*. 2007. V.24(1). Pp. 133-145.
20. Tas Global commercialises robot system for hull cleaning [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ship-technology.com/news/tas-global-robot-system/> (дата обращения: 04.05.2022).
21. Balashov V.S., Gromov B.A., Ermolov I.L., Roskilly A.P. Cleaning by means of the HISMAR autonomous robot. *Russian engineering research*. 2011. V.31(6). Pp. 589–592.
22. Korn G.A., Korn T.M. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov: Opredeleniya. Teoremy. Formuly* [Handbook of mathematics for researchers and engineers: Definitions. Theorems. Formulas]. SanktPeterburg: Lan', 2003. 831 p.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Сергей Иванович Корягин**, доктор технических наук, профессор, профессор института Высоких технологий, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru

**Sergey I. Koryagin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the High Technologies Institute, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru

**Николай Леонидович Великанов**, доктор технических наук, профессор, профессор института Высоких технологий, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

**Nikolay L. Velikanov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the High Technologies Institute, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

**Олег Васильевич Шарков**, доктор технических наук, доцент, профессор института Высоких технологий, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru

**Oleg V. Sharkov**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Professor of the High Technologies Institute, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 06.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

**Научная статья**

УДК 620.169.1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.008>

## **Исследование долговечности судовых надстроек из композиционного материала при соединении со стальным корпусом**

**Али Саламех<sup>1</sup>, e-mail: a.salameh@mail.ru, Мазен Алсаид<sup>2</sup>, e-mail: mazenal60@yahoo.com**

<sup>1</sup>Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф.М. Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, <sup>2</sup>Астраханский государственный технический университет

**Аннотация.** Область применения легких судостроительных материалов значительно развивается в последние годы. Это связано со стремлением к постройке судов с минимальным водоизмещением и, следовательно, с минимальным расходом топлива. Полимерные композитные материалы (ПКМ) являются качественным примером для достижения данной цели, при этом использование ПКМ для постройки корпуса судна в целом является нерентабельно с точки зрения стоимости изготовления, сложности и дорогостоящей технологии, в частности, для транспортных судов. Гибридные суда, где надстройка строится из ПКМ и основный корпус из металла является более эффективными и нашли применение в практике постройки судов. Для судов такого проекта важным вопросом служит метод соединения надстройки из ПКМ с основным металлическим корпусом. Узлы соединения надстройки из ПКМ с металлическим корпусом транспортных судов является объектом исследования. В данной работе рассмотрены основные методы, применяемые для соединения надстройки с корпусом. Проведен анализ главных нагрузок, действующих на узлы соединения надстройки с корпусом во время эксплуатации. Экспериментально изучено влияние методов соединения на циклическую долговечность надстроек из ПКМ. Испытания проводились на образцах, состоящих из двух частей: одна из ПКМ и другая из судостроительной стали, соединенных между собой разными методами – болтовым, заклепочным и kleeboltовым. Результаты показывают, что метод соединения существенно влияет на циклическую долговечность материала надстройки, при этом лучшие показатели обнаружились у образцов с kleeboltовым соединением, а во второй степени у болтовых и заклепочных соединений. Установлены уравнения выносливости в виде зависимости напряжения от количества циклов до разрушения для каждой группы образцов, что является основанием для прогнозирования циклической долговечности легких судовых надстроек, изготовленных из ПКМ.

**Ключевые слова:** судостроение, полимерные композиционные материалы, метод соединений, узлы соединений надстройки с корпусом, стеклянные волокна, смола, надстройка, циклическая долговечность.

**Для цитирования:** Саламех Али, Алсаид Мазен Исследование долговечности судовых надстроек из композиционного материала при соединении со стальным корпусом, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 64—72

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.008>

## **Investigation of the durability of ship's superstructures made from composite materials while connecting a steel hull**

**Salamkh Ali<sup>1</sup>, e-mail: a.salameh@mail.ru Mazen Alsaaid<sup>2</sup>, e-mail: mazenal60@yahoo.com**

<sup>1</sup>Caspian Institute of Sea and River Transport named after General-Admiral F.M. Apraksin – the affiliation of the Volga State University of Water Transport", <sup>2</sup>Astrakhan State Technical University"

**Abstract.** The use of light shipbuilding materials has been developing significantly in recent years. It is connected with the intention to build ships with a minimum displacement and also, with a minimum fuel consumption. Polymer composite materials (PCM) can be a qualitative example for achieving this goal, while the use of PCM for the construction of a ship's hull is generally unprofitable in terms of manufacturing cost and complexity and expensive technology, in particular, for transport ships. Hybrid ships, where the superstructure is built of PCM and the main hull is made from metal are more efficient and are used in the practice of building ships. For ships of such a project, an important issue is the method of connecting the PCM superstructure with the main metal hull. The object of research is the joints of the PCM superstructure with the metal hull of transport ships. This paper discusses the main methods used to connect the superstructure to the hull. The analysis of the main loads acting on the joints of the superstructure with the hull during operation is carried out. The influence of joining methods on the cyclic durability of PCM superstructures has been studied experimentally. The tests were carried out on samples consisting of two parts: one made of PCM and the other made of shipbuilding steel, connected to each other by different methods - bolted, riveted and glue-bolted. The results show that the joining method significantly affects the cyclic durability of the superstructure material, with better performance for specimens with glue-bolted joints, and, to the second degree, for bolted and riveted joints. The equations of the strain endurance from the number of cycles to failure for each group of samples are established. It is the basis for predicting the cyclic durability of light ship superstructures made of PCM.

**Key words:** shipbuilding, polymer composite materials, joining method, superstructure-hull joints, glass fibers, resin, superstructure, cyclic durability. 2022. № 2 part 1. P. 64—72

**For citation:** Salamekh Ali, Alsaid Mazen Investigation of the durability of ship's superstructures made from composite materials while connecting a steel hull, Marine intellectual technologies.

## Введение

Снижение массы основного корпуса судна или надстройки ведет к уменьшению веса судна порожнем, что дает возможность повысить экономическую эффективность судна увеличением грузоподъемности, уменьшением расхода топлива или мощности главных двигателей или повышением скорости движения [1]. Уменьшение веса судна порожнем можно достичь применением легких судостроительных материалов для изготовления корпусных конструкций, примером таких материалов является полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые характеризуются высоким соотношением прочности к весу и жесткости к весу [2]. Использование ПКМ для постройки корпуса судна в целом является нерентабельно с точки зрения стоимости материалов, сложности и дорогостоящей технологии, в частности, для транспортных судов. Более эффективным решением является постройка судов, где основной корпус изготавливают из судостроительной стали, а надстройки – из ПКМ. Возможность применения такого проекта для транспортных судов была подтверждена Правилами новой редакции Российского Морского Регистра Судоходства (РМРС), которые стали распространяться на надстройки, изготовленные из ПКМ и прикрепленные к металлическому корпусу судна [3]. Данные правила разрешают использовать в качестве материала надстроек однослойную конструкцию, состоящую из определенного количества слоев армирующего элемента, и трехслойную конструкцию, состоящую из 2 несущих слоев с заполнителем между ними (сэндвич).

Применение ПКМ для изготовления надстроек военных кораблей было обосновано в начале 1980 г. в целях уменьшения веса кораблей и улучшения мореходных качеств [4]. Исследования, выполненные в ряде работ [5,6] показывают, что масса надстройки из ПКМ, по сравнению со стальной надстройкой таких же размеров, бывает меньше на 15-70 %. Выполненные расчёты в работе [7] показывают, что при модернизации проекта СПК 17091 «Полесье» надстройкой из ПКМ его пассажировместимость может быть увеличена с 51 человека до 60 человек, причем по характеристикам экономичности данный проект превосходит на 33% проект 23180 пассажирского СПК «Валдай-45Р», имеющий пассажировместимость 45 человек, при одинаковой мощности главного двигателя.

Стоимость изготовления надстроек из ПКМ превышает стальные на 9-47 % согласно результатам работы [8], при этом эта стоимость компенсируется во время эксплуатации за счет уменьшения расходов на техническое обслуживание, ремонт и повышения ремонтопригодности судна в следствии уменьшения возможности появления усталостных дефектов [9].

При реализации постройки судов с надстройкой из ПКМ и металлическим корпусом возникает важный вопрос о методе соединения надстройки с корпусом. Существуют некоторые научные работы, занимающиеся данным вопросом [10-12], в основе

которых можно отличать два типа соединения, использованные на судах.

Первый тип узлов соединения (рис.1) [10], применяемый на военном многоцелевом фрегате ВМС Франции (French frigate La Fayette), где металлическая пластина лежит между наружными и внутренними слоями из ПКМ и соединяется с ними и с заполнителем совместно при отверждении смолы методом вакуумной инфузии. В работе [11] изучали влияния геометрических размеров на прочность узлов соединения первого типа и пришли к выводу, что увеличение дины стальной пластины, которая входит в композит изменяет вид разрушения от разрушения заполнителя к сгибанию стальной пластины.

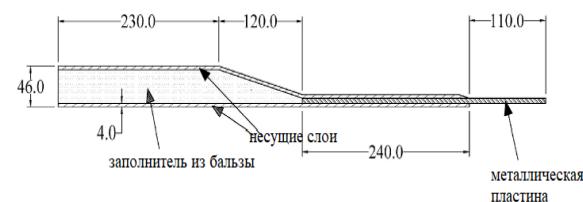


Рис. 1. Первый тип соединения надстройки из ПКМ с корпусом

Второй тип соединения надстройки из ПКМ с корпусом используется для военного корабля ВМС РФ класса корветы проект 20380 «Стерегущий» и представляет собой kleeboltovye соединения с распределением болтов в шахматном порядке (рис.2) [12].

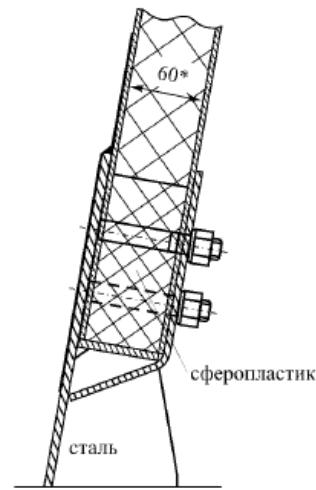


Рис. 2. Второй тип соединения надстройки из ПКМ с корпусом

Исходя из вышесказанного можно заметить, что большинство научных исследований в области соединения надстройки из ПКМ с металлическим корпусом уделяют внимание трехслойной конструкции с заполнителем (сэндвич), также можно установить, что влияние типа соединения на циклическую долговечность судовых надстроек мало изучено, поэтому решение данного вопроса является актуальной задачей исследования.

Целью данной работы является исследование влияния метода соединения надстройки из ПКМ с металлическим корпусом на циклическую долговечность лёгких судовых надстроек транспортных судов. Объектом исследования служат узлы соединения надстройки с корпусом, выполненные разными методами – болтовые, заклепочные и kleeboltовые соединения.

### 1. Анализ напряженного состояния в узлах соединения надстройки с корпусом

Легкие судовые надстройки не участвуют в общем изгибе судна, поэтому в зоне соединения с корпусом не возникают нормальные и касательные силы. Основными причинами наряженного состояния в узлах соединения надстройки из ПКМ с корпусом являются (рис.1):

- весовая нагрузка ( $F_1$ ) в результате влияния массы надстройки и расположенных в ней элементов;
- циклическая ветровая нагрузка ( $F_2$ ), возникающая в результате морского ветра во время эксплуатации;
- инерционные составляющие ( $F_3$ ), которые возникают в результате качки судна при волнении.

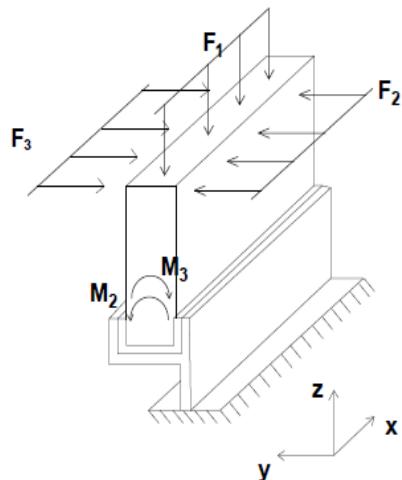


Рис. 1. Нагрузки, действующие на стены надстройки во время эксплуатации

На протяжении срока службы судна под действием указанных нагрузок в зоне соединения надстройки из ПКМ с металлическим корпусом появляются усталостные трещины микроскопического размера, которые ведут к усталости материала и его разрушению. Для исследования циклической усталости узлов соединения надстройки с корпусом была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка (рис.2), которая моделирует влияния нагрузок  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  на испытуемый образец.



Рис. 2. Экспериментальная установка для проведения испытаний узлов соединений надстройки с корпусом на циклическую долговечность

Экспериментальная установка обеспечивает сложное напряженное состояние в испытуемом образце тремя механизмами, конструктивно соединенными между собой: механизм статического нагружения; кулисный механизм и механизм качки [13]. Металлический трос 1 влияет на испытуемый образец 10 со сжимающей силой  $F_1$ , регулировка которой осуществляется с помощью динамометра 2 и талрепа 3. Подвижный захват 9 с кулисой 6 предают колебательное движение образца пропорционально силе  $F_2$ . Грузы 4 при колебательном движении платформы 5 создают инерционные составляющие  $F_3$  на образец (рис.3).

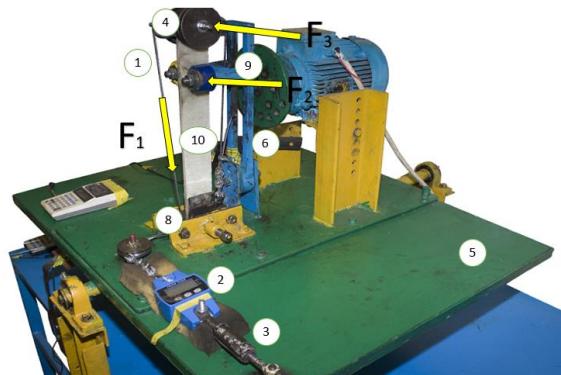


Рис. 3. Нагрузки, действующие на образец в ходе испытания на циклическую долговечность

Во время испытаний образцы закрепляются в неподвижном захвате 8 и выполняют симметричное колебательное движение. Под влиянием сложного напряжения ( $\sigma$ ), состоящего из трех компонентов напряжений от действия сил  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  образец должен сломаться. С помощью счетчика количества циклов производится регистрация количества циклов до разрушения под действием известного суммарного напряжения  $\sigma$ . Напряжение, возникающее в сечении образца в зоне закрепления в неподвижном захвате в результате действия нагрузок  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ , определяется скалярной суммой:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (1)$$

## 2. Материалы и метод проведения исследования

Для исследования влияния метода соединения надстройки из ПКМ с металлическим корпусом были изготовлены четыре группы образцов (А, В, С, D):

А – Образцы из ПКМ без соединения с размерами  $450 \times 60 \times 10$  мм, используются в качестве объекта для сравнения результатов;

В, С, D – образцы с применением разных методов соединений – заклёточные, болтовые и kleeboltovye соответственно.

Испытуемый образец для групп (В, С, D) состоит из двух частей, одна из ПКМ с такими же размерами как образцы группы (A) а другая в виде двух пластин из судостроительной стали СТЗпс ГОСТ 5521-93 с размерами  $100 \times 60 \times 8$  мм. Основные размерения образца и захвата для его закрепления на установке показаны на рис.4.

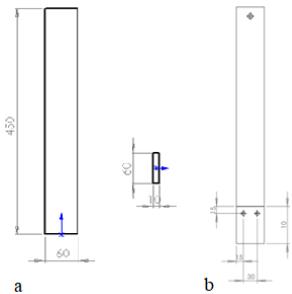
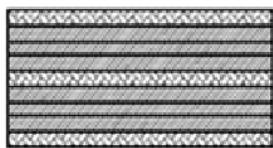


Рис. 4. Вид и размеры образца для проведения испытаний на циклическую долговечность: а - часть из ПКМ; б - параметры соединения

Для всех групп образцов композитная часть была изготовлена из 9 слоев армирующего элемента, при этом 6 слоев из эмульсионного стекломата марки (EMC-600) и 3 слоя из ровинговой стеклоткани марки (EWR 580). Данные материалы одобрены Регистром судоходства Ллойда (Lloyd's Register) для изготовления судовых конструкций судов, находящихся под его надзором [14,15]. Схема укладки слоев композитной части образцов показана на рис. 5. Основные свойства данных компонентов приведены в таблице 1 и в таблице 2.



ровинговая стеклоткань

стекломат

Рис. 5. Схема укладки слоев армирующего элемента композитной части образцов

В качестве связующего для композитной части образцов всех групп была использована полизэфирная смола «Яркопол-110» [16], Основные физико-механические характеристики использованной смолы приведены в таблице 3.

Таблица 1  
Основные свойства эмульсионного стекломата марки (EMC-600)

Характеристика	Значение
Поверхностная масса, г/м <sup>2</sup>	$600 \pm 7,5$
Содержание замасливателя, %	$3,5 \pm 1,1$
Содержание влаги, %	$\leq 0,2$
Разрывная нагрузка по основе, Н	$\geq 160$
Разрывная нагрузка по утоку, Н	$\geq 160$
Содержание горючих, %	$4,0 \pm 0,8$

Таблица 2  
Основные свойства ровинговой стеклоткани марки EWR 580

Характеристика	Значение
Поверхностная масса, г/м <sup>2</sup>	$576 \pm 28,8$
Содержание замасливателя, %	$0,6 \pm 0,2$ %
Содержание влаги, %	$\leq 0,15$
Разрывная нагрузка по основе, Н	2800
Разрывная нагрузка по утоку, Н	2800

Таблица 3  
Физико-механические характеристики полизэфирной смолы «Яркопол-110»

Характеристика	Значение
Внешний вид	Жидкость от синего до фиолетового цвета
Плотность, при $t = 23$ °С, г/см <sup>3</sup>	1,13-1,14
Массовая доля стирола, %	35±2
Время желатинизации, при $t = 20$ °С, мин	30 – 45
Прочность при разрыве, МПа	45-65
Изгибающее напряжение при разрушении, МПа	70-100
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	90-140
Относительное удлинение при разрыве, %	3-5
Модуль упругости при изгибе, МПа	3200-3800

Все образцы ПКМ для проведения испытаний выпиливались из пластин квадратной формы с размерами  $600 \times 600$  мм, изготовленных методом ручного контактного формования, при этом для каждого слоя армирующего элемента была нанесена  $400 \text{ см}^3$  связующего компонента с добавлением стандартной пропорции (2,5%) отвердителя Бутанокс М-50 согласно рекомендациям производителя.

Для всех методов соединения (болтовых, заклёточных и kleeboltovых) использованы болты и заклепки такого же материала (Углеродистая сталь), а в качестве клея для kleeboltovых соединений был использован эпоксидный клей марки ЭД-20, основные характеристики которого приведены в таблице 4 [17]. Толщина kleевого шва составляет 0,5

мм. Заклепочные соединения были изготовлены методом холодного прессования.

**Таблица 4**  
**Физико-механические характеристики эпоксидного клея «ЭД-20»**

Характеристика	Значение
Внешний вид	Вязкая, прозрачная
Массовая доля эпоксидных групп, %	20-22,5
Массовая доля иона хлора, %, не более	0,001
Массовая доля гидроксильных групп, %, не более	1,7
Массовая доля летучих веществ, %, не более	0,2
Динамическая вязкость, Па*сек, при (25±0,1)°C	13-20
Время желатизации, час., не менее	8

Испытания образцов проводились согласно ГОСТу 33845 – 2016 (ISO 13003:2003) [18] на экспериментальной установке, показанной на рис.2 и рис.3, при частоте нагружения, равной 5 Гц с коэффициентом асимметрии ( $R = -1$ ) и под действием следующей нагрузки: статическая сжимающая нагрузка  $F_1$ ; циклическая нагрузка  $F_2$  и инерционные составляющие  $F_3$ . Для всех образцов были фиксированы следующие параметры работы установки:

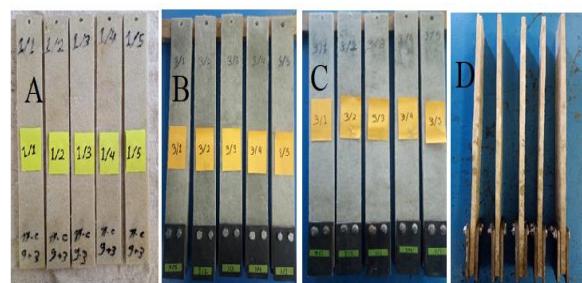
- статическая сжимающая нагрузка  $F_1=2000$  N;
- Угол качения платформы (5)  $\Theta=12^\circ$ ;
- масса грузов (4) m=2 кг;

Напряжение в сечении испытуемого образца изменяется за счет изменения амплитуды колебательного движения кулисы (9), при этом на каждом уровне напряжения было испытано 5 образцов для каждой группы.

### 3. Исследование влияния типа связующего на циклическую долговечность ПКМ

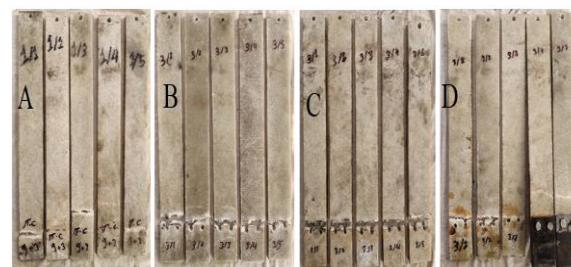
Для исследования влияния метода соединения на циклическую долговечность надстроек из ПКМ были изготовлены и испытаны серии образцов (A, B, C, D) на разработанной экспериментальной установке рис. 2. Фрагмент изготовленных образцов групп (A, B, C, D) для проведения испытаний на циклическую долговечность показаны на рис.6.

Испытания проводились при разных уровнях напряжения, при этом в ходе испытаний зафиксировано количество циклов (N) колебательного движения испытуемого образца до момента разрушения с помощью счётчика циклов. Результаты испытаний образцов групп (A, B, C, D) приведены в таблице 5.



**Рис. 6. Образцы для проведения испытаний на циклическую долговечность: A- без соединений; B- болтовые соединения; C- заклёточные соединения; D- kleebolтовые соединения**

При анализе вида разрушения образцов (рис. 7) можно заметить, что разрушение образцов групп (B, C) приходилось в месте отверстий, которое является концентратором напряжений, также для образцов групп (D) в некоторых образцах обнаружилось разрушение вне зоны соединения, а на расстоянии от отверстия, что свидетельствует о том, что клей усиливает соединения больше чем в сечении самого образца из ПКМ. Для образцов без соединения разрушение происходило в виде разрыва в месте закрепления образца в неподвижном захвате экспериментальной установки.



**Рис. 7. Образцы после проведения испытаний на циклическую долговечность: A- без соединений; B- болтовые соединения; C- заклёточные соединения; D- kleebolтовые соединения**

На основе регрессионного анализа экспериментальных данных, полученных при испытаниях образцов ПКМ на установке, и с помощью пакета статистической программы Minitab 18.1 были получены уравнения выносливости ПКМ для образцов при каждом методе соединения в координатах ( $\sigma - \lg(N)$ ) (рис. 8), (рис. 9), (рис. 10) и (рис. 11):

- для образцов группы (A) без соединения:  

$$\sigma = 3321,6 - 37,07 \lg(N);$$
- для образцов группы (B) с заклёточными соединениями:  

$$\sigma = 277,8 - 33,83 \lg(N);$$
- для образцов группы (C) с болтовыми соединениями:  

$$\sigma = 295,7 - 35,95 \lg(N);$$
- для образцов группы (D) с kleebolтовыми соединениями:  

$$\sigma = 307,0 - 37,13 \lg(N).$$

**Таблица 5**  
Результаты испытаний образцов с разными методами соединения (A, B, C, D) на циклическую долговечность

№.	$\sigma$ , Мпа	метод соединения			
		A	B	C	D
Число циклов до разрушения (N)					
1	176	7794	1628	3141	4406
2		6853	1250	3965	4520
3		7075	1932	3015	4734
4		7682	1922	3642	5320
5		7465	1633	3395	5674
1	148	53090	3778	7943	11832
2		68528	3985	8036	13903
3		63363	3115	8310	10963
4		57841	3489	8660	12845
5		6087	4315	8485	14562
1	132	121024	27508	30994	49450
2		130420	23296	31550	53241
3		125390	25400	38598	47103
4		146328	26131	35712	46973
5		153488	25322	32788	50217
1	117	350736	78880	95981	181415
2		365214	92832	111487	183350
3		372288	81262	105342	178560
4		378442	72496	125367	162458
5		355789	68711	117685	189351
1	101	774897	98622	170320	279233
2		805620	110980	210458	266953
3		814574	130765	220876	262145
4		795754	106651	242960	280651
5		890414	124457	188954	275865
1	89	1828731	312256	458674	632109
2		1787752	290045	482145	610574
3		1877914	357841	523874	654771
4		1709981	309325	542711	702325
5		1780803	349881	480512	625894
1	84	-	685023	1067340	1224092
2		-	620457	985348	1088426
3		-	710327	1168732	1325196
4		-	695817	1056894	1209784
5		-	668907	954142	1485621

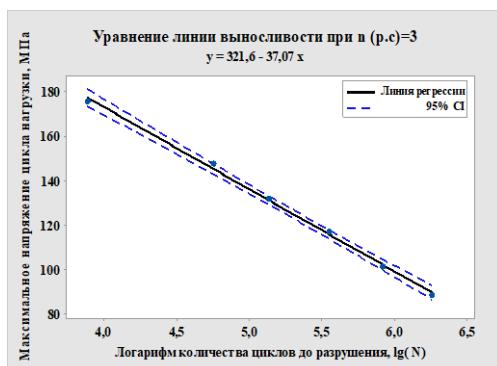


Рис. 8. Линия выносливости ПКМ без соединения при применении полиэфирной смолы «Яркопол-110»

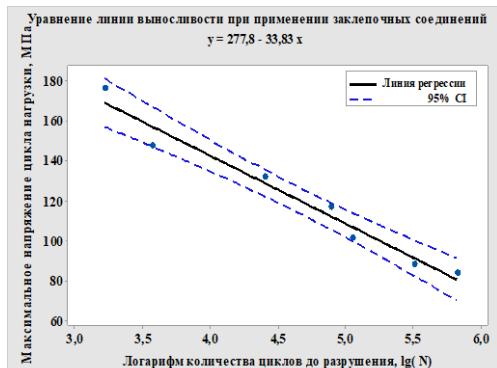


Рис. 9. Линия выносливости образцов групп (B) при применении заклепочных соединений

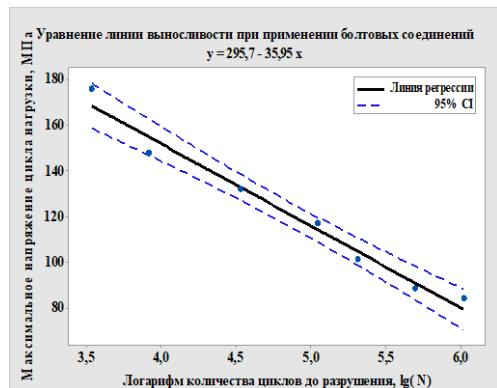


Рис. 10. Линия выносливости образцов групп (C) при применении болтовых соединений

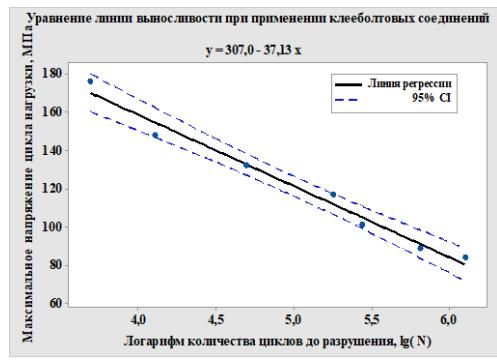


Рис. 11. Линия выносливости образцов групп (D) при применении kleebolтовых соединений

Результаты испытаний образцов групп (A, B, C, D) показывают, что по сравнению с материалом без соединения долговечность ПКМ уменьшается из-за соединения, при этом метод соединения значительно влияет на циклическую долговечность материала. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что лучшие показатели циклической долговечности найдены у образцов с kleebolтовыми соединениями, а во второй степени у образцов с болтовыми и заклепочными соединениями (рис.12). Циклическая долговечность ПКМ с kleebolтовыми соединениями в среднем больше чем долговечность образцов с болтовыми соединениями на 28,61 % и на 56,54% по сравнению с долговечностью ПКМ с заклепочными соединениями.

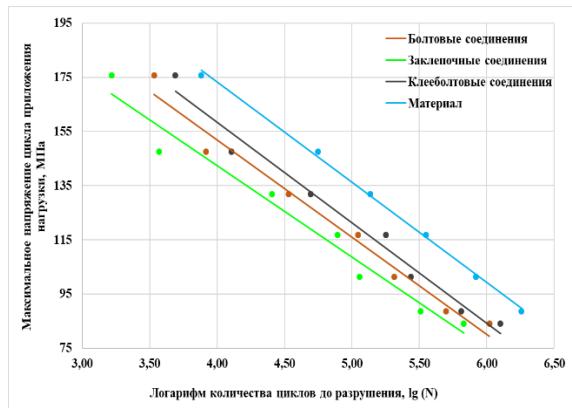


Рис. 12. Сравнение результатов испытаний на циклическую долговечность ПКМ с применением разных методов соединений

Для прогнозирования долговечности ПКМ, армированных стеклянными волокнами, на основе полученных результатов были разработаны поправочные коэффициенты (рис. 13).

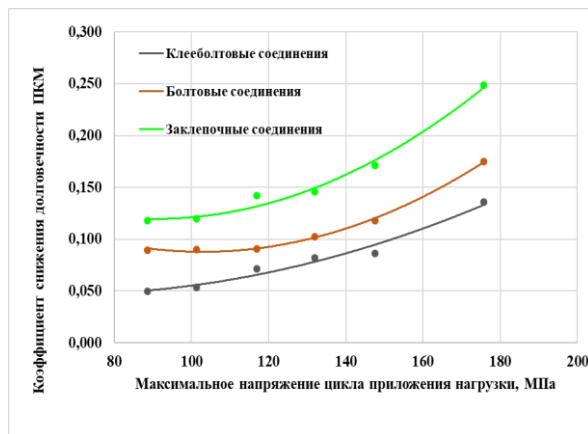


Рис. 13. Коэффициенты снижения циклической долговечности ПКМ в зависимости от метода соединения

Данные коэффициенты определяют процент снижения циклической долговечности ПКМ в зависимости от выбранного метода соединения. Для исследуемых ПКМ в данной работе установлено, что коэффициенты снижения долговечности при применении kleebolтовых соединений находятся в диапазоне 0,049-0,139. При выборе болтовых соединений поправочный коэффициент находится в диапазоне 0,090-0,175, а для заклепочных соединений – 0,118-0,248.

### Заключение

Данное исследование изучает влияние метода соединения надстроек из ПКМ с металлическими корпусами на циклическую долговечность материала надстроек. Для достижения поставленной цели были изготовлены четыре группы образцов, одна из них представляет собой материал ПКМ без соединения (A), а три остальные группы (B,C,D) изготовлены с применением разных методов соединений – заклепочные, болтовые и kleebolтовые. В составе композитной части образцов входит эмульсионный стекломат марки (ЕМС-600) и ровиновой стеклоткани марки EWR 580 в качестве армирующих элементов, а в качестве связующего компонента использована полиэфирная смола «Яркопол-110».

Испытания образцов на циклическую долговечность проводились на разработанной установке, которая позволяет создавать напряженное состояние в испытуемом образце, моделирующее нагрузки на стены надстроек во время эксплуатации. Результаты проведенных испытаний показывают, что метод соединения существенно влияет на циклическую долговечность ПКМ, при этом циклическая долговечность ПКМ с kleebolтовыми соединениями в среднем больше чем долговечность образцов с болтовыми соединениями на 28,61 % и на 56,54% по сравнению с долговечностью ПКМ с заклепочными соединениями.

Также в данной работе на основе экспериментальных данных получены поправочные коэффициенты, определяющие снижение циклической долговечности ПКМ в зависимости от метода соединения с корпусом. Коэффициенты снижения долговечности при применении kleebolтовых соединений находятся в диапазоне 0,049-0,139. При выборе болтовых соединений поправочный коэффициент находится в диапазоне 0,090-0,175, а для заклепочных соединений – 0,118-0,248.

Результаты, полученные в данном исследовании, являются базой для прогнозирования циклической долговечности судовых надстроек, изготовленных из ПКМ и прикрепленных к металлическому корпусу гибридных транспортных судов.

### Литература

- Алсаид Мазен. Экономическая эффективность при изготовлении надстроек судов из композиционных материалов/ М. Алсаид, А. Саламех// Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции в рамках программы проведения торжественных мероприятий, посвящённых празднованию 100-летия Астраханского речного училища. 2018. С. 132-135.

2. Jones, Robert M., 1999. Mechanics of Composite Materials, second ed. Taylor and Francis group, Philadelphia, p. 2. I-5G032-712-X.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVI. Конструкция и прочность корпусов судов из полимерных композиционных материалов. –СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019, 151с.
4. Mouritz, A. P., Gellert, E., Burchill, P. and Challis, K. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines, Composite Structs, 2001, 53, 21–41.
5. Smiht CS, Chomers DW. Design of ship superstructures in fiber reinforced plastic. Royal Institution of Naval Architects (RINA), London, April 1986. Paper № 3.
6. Forbes J, Judd G. Design, fabrication and testing of composite superstructures for warships. In: Proceedings the International Conference on Advances in Marine Structure III, Dunfermline, 1997 May 20-30.
7. Францев М. Э. Создание надстройки пассажирского судна на подводных крыльях. Проект по Правилам / М. Э. Францев // Композитный мир. – 2016. –№ 5. – с.40 – 48.
8. Dodkins A R, Williams TJ. Sandwich structure for naval vessels. In: Proceedings of the International Conference Offshore and Marine Composites, Newcastle UK,2000 April 5-6.
9. Hoyning B, Taby J. Warship design: the potential for composites in frigate superstructures. In: Proceedings of the International Conference on Lightweight Construction Latest Developments, 2000 February 24-25.Paper№ 16.
10. Boyd, S. Integrity и of hybrid steel-to-composite joints for marine hatch% applications/ Boyd, S.; Blake, J.I.R.; Shenoi, R.A.; Kapadia, A./ Proceedings of the particle Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. – 2004. – vol. 218. – pp.235 -246.
11. Clifford SM, Manger CIC, Clyne TW. Characterization of a glassfiber reinforced baker vinyl ester to steel joint for use between a naval GRP superstructure and a steel hull. / Clifford SM, Manger CIC, Clyne к TW //Compos Struct. – 2002. – №57. – Pp 59 -66.
12. Булкин В.А. Анализ строительства и опыта эксплуатации надстройки из полимерных композиционных материалов на корабле класса «Корвет»/ В.А. Булкин, буланов К.Г. Голубев, Н.Н. Федонюк//Труды крыловского государственного научного центра. – 2011. – № 1(342). – с. 127-136.
13. Патент на полезную модель 205 463 Российской Федерации, МПК B63B 79/30 (2020.01) G01N 3/32 (2006.01). Установка для испытаний соединений судовых корпусных конструкций на циклическую долговечность / М. Алсаид, А. Саламех, В.А. Чанчиков, В.А. Петровский: заявитель и патентообладатель Алсаид Мазен, Саламех Али, – № 2020139513, заяв. 01.12.2020; опубл. 15.07.2021, Бюл. № 20.
14. E-Glass Emulsion Chopped Strand Mat. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://en.jushi.com/uploads/soft/jushiEN%20Products/EGlass%20Emulsion%20Chopped%20Strand%20MatE02.pdf> (дата обращения: 11.02.2019).
15. Ровинговая стеклоткань марки EWR 560: [Электронный ресурс] . — Режим доступа: [URL: http://www.glass-tex.ru/index.php/steklovolokno/steklotkan-rovingovaya](http://www.glass-tex.ru/index.php/steklovolokno/steklotkan-rovingovaya) (дата обращения:12.02.2020).
16. Характеристики смолы «Яркопол-110». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://megaplast.org/images/pdf/Yarkopol\\_110.pdf](http://megaplast.org/images/pdf/Yarkopol_110.pdf) (дата обращения:11.02.2019).
17. Эпоксидная смола эд-20. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.lakma.info/ed-20/> (дата обращения: 25.04.2020).
18. ГОСТ 33845-2016. Композиты сжатие полимерные. Метод самого определения изгибе характеристик образцов усталости длинных в условиях гипотезы циклического положении нагружения. - М.: вакуумной Стандартинформ, 2016. - 45 с.

#### References

1. Alsaid Mazen. Jekonomiceskaja jeffektivnost' pri izgotovlenii nadstroek sudov iz kompozicionnyh materialov/ M. Alsaid, A. Salameh// Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii v ramkah programmy provedenija torzhestvennyh meroprijatij, posvjashchonnyh prazdnovaniju 100-letija Astrahanskogo rechnogo uchilishha. 2018. S. 132-135.
2. Jones, Robert M., 1999. Mechanics of Composite Materials, second ed. Taylor and Francis group, Philadelphia, p. 2. I-5G032-712-X.
3. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Chast' XVI. Konstrukcija i prochnost' korpusov sudov iz polimernyh kompozicionnyh materialov. –SPb: Rossijskij morskoj registr sudohodstva, 2019,151s.
4. Mouritz, A. P., Gellert, E., Burchill, P. and Challis, K. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines, Composite Structs, 2001, 53, 21–41.
5. Smiht CS, Chomers DW. Design of ship superstructures in fiber reinforced plastic. Royal Institution of Naval Architects (RINA), London, April 1986. Paper № 3.
6. Forbes J, Judd G. Design, fabrication and testing of composite superstructures for warships. In: Proceedings the International Conference on Advances in Marine Structure III, Dunfermline, 1997 May 20-30.
7. Francev M. Je. Sozdanie nadstrojki passazhirskogo sudna na podvodnyh kryl'jah. Proekt po Pravilam / M. Je. Francev // Kompozitnyj mir. – 2016. –№ 5. – s.40 – 48.
8. Dodkins A R, Williams TJ. Sandwich structure for naval vessels. In: Proceedings of the International Conference Offshore and Marine Composites, Newcastle UK,2000 April 5-6.
9. Hoyning B, Taby J. Warship design: the potential for composites in frigate superstructures. In: Proceedings of the International Conference on Lightweight Construction Latest Developments, 2000 February 24-25.Paper№ 16.
10. Boyd, S. Integrity и of hybrid steel-to-composite joints for marine hatch% applications/ Boyd, S.; Blake, J.I.R.; Shenoi, R.A.; Kapadia, A./ Proceedings of the particle Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. – 2004. – vol. 218. – pp.235 -246.

11. Clifford SM, Manger CIC, Clyne TW. Characterization of a glassfiber reinforced baker vinyl ester to steel joint for use between a naval GRP superstructure and a steel hull. / Clifford SM, Manger CIC, Clyne к TW //Compos Struct. – 2002. – №57. – Pp 59 -66.
12. Bulkin V.A. Analiz stroitel'stva i opyta jeksploatacii nadstrojki iz polimernyh kompozicionnyh materialov na korable klassa «Korvet»/ V.A. Bulkin, bulanov K.G. Golubev, N.N. Fedonjuk//Trudy krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. – 2011. – № 1(342). – s. 127-136.
13. Patent pa poleznju model' 205 463 Rossijskaja Federacija, MPK B63B 79/30 (2020.01) G01N 3/32 (2006.01). Ustanovka dlya ispytanij soedinenij sudovyh korpusnyh konstrukcij na ciklicheskuju dolgovechnost' / M. Alsaid, A. Salameh, V.A. Chanchikov, V.A. Petrovskij: zajavitel' i patentooobladatel' Alsaid Mazen, Salameh Ali, – № 2020139513, zajav. 01.12.2020; opubl. 15.07.2021, Bjul. № 20.
14. E-Glass Emulsion Chopped Strand Mat. [Jelektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: <http://en.jushi.com/uploads/soft/jushiEN%20Products/EGlass%20Emulsion%20Chopped%20Strand%20MatE02.pdf> (data obrashhenija: 11.02.2019).
15. Rovingovaja steklotkan' marki EVR 560 : [Jelektronnyj resurs] . — Rezhim dostupa: URL:<http://www.glass-tex.ru/index.php/steklovolokno/steklotkan-rovingovaya> (data obrashhenija:12.02.2020).
16. Harakteristiki smoly «Jarkopol-110». [Jelektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: [http://megaplast.org/images/pdf/Yarkopol\\_110.pdf](http://megaplast.org/images/pdf/Yarkopol_110.pdf) (data obrashhenija:11.02.2019).
17. Jepoksidnaja smola jed-20. [Jelektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: <http://www.lakma.info/ed-20/> (data obrashhenija: 25.04.2020).
18. GOST 33845-2016. Kompozity szhatie polimernye. Metod samogo opredelenija izgibe harakteristik obrazcov ustalosti dlinnyh v uslovijah gipotezy ciklicheskogo polozhenii nagruzhenija. - M.: vakuumnoj Standartinform, 2016. - 45 s.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Саламех Али,** Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой Судомеханических дисциплин, Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф.М. Апраксина – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», 414000, г. Астрахань, ул. Никольская 6, e-mail: a.salameh@mail.ru

**Алсаид Мазен,** аспирант, аспирант кафедры Судостроения и энергетических комплексов морской техники (СиЭКМТ), Астраханский государственный технический университет, 414056 г. Астрахань ул. Татищева к.16, e-mail: mazenal60@yahoo.com

**Salamekh Ali,** Ph.D. (Eng), assistant professor, head of department Ship mechanical disciplines, Caspian Institute of Sea and River Transport named after General-Admiral F.M. Apraksin – the affiliation of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volga State University of Water Transport" Nikolskaya st. 6 , Astrakhan, 414000, Russian Federation, e-mail: a.salameh@mail.ru

**Alsaid Mazen,** Postgraduate Student, Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Technological Equipment, Astrakhan State Technical University, Tatishchev str., Building 16, Astrakhan. 414056 , Russian Federation, e-mail: mazenal60@yahoo.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.03.2022.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 11.05.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 21.05.2022.

## **СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)**

### **SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)**

*Научная статья*

*УДК 621.431.74.016*

*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.009>*

#### **Контрольно-измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля**

**Б.И. Руднев<sup>1</sup>** [povalichina@mail.ru](mailto:povalichina@mail.ru), **О.В. Повалихина<sup>1</sup>** [povalichina@mail.ru](mailto:povalichina@mail.ru)

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

**Аннотация.** Сокращение сроков доводки новых моделей судовых дизелей по-прежнему остается актуальной проблемой. Основная причина увеличения указанных сроков – это весьма существенное отличие расчетных и экспериментальных данных, полученных на испытательных стендах. В частности, по локальным тепловым потокам, передаваемым от рабочего тела к деталям камеры сгорания, упомянутое отличие составляет 25 – 50%. Это не позволяет на стадии проектирования с достаточной точностью задать граничные условия при расчетном анализе теплового и напряженно-деформированного состояния деталей, образующих камеру сгорания (крышки цилиндров, поршня и втулки) и влечет за собой значительное увеличение сроков экспериментальной доводки новых моделей судовых дизелей. Показано, что даже при использовании современных программных комплексов, в которых реализуются весьма сложные с физической точки зрения математические модели, требуется задавать некоторые параметры априори или пользоваться существующими экспериментальными данными. Целью данной статьи является представление 12 канального контрольно-измерительного комплекса, реализующего современные экспериментальные методики по определению параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена и позволяющего получить достоверные экспериментальные данные. Отмечено, что полученные с помощью этого комплекса экспериментальные данные могут составить надежную базу данных для проверки адекватности математических моделей, используемых конструкторами на стадии проектирования судовых дизелей.

**Ключевые слова:** частицы сажи, проба, осадительная поверхность, камера сгорания, судовой дизель, электронный микроскоп.

**Для цитирования:** Руднев Б.И., Повалихина О.В. Контрольно-измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля 2022. № 2 часть 1. С. 73—78

*Original article*

*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.009>*

#### **Control measured complex for the investigation of parameters of operation process and radiative convection heat transfer in the combustion chamber of a marine high speed diesel engine**

**Boris I. Rudnev<sup>1</sup>, Olga V. Povalikhina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Far Eastern State Technical Fisheries University, Russian Federation

**Abstract.** Reduction of terms of drive new models of marine diesel engines is actual problem as before. The mean reason of increasing this terms is based on difference of calculation and experimental data reseeded in experimental stands. As for local heat fluxes transferred from gases to details of combustion chamber which is 25 – 50 per cent. This desnot determine boundary conditions in calculative analysis thermal and power deformable condition of details formed the combustion chamber (heat of cylinder, piston, liner of cylinder) and involves great terms of experimental drive in new models of marine diesel engines. It is shown that even in using modern programmers complexes in which mathematical models physical complex some parameters need to use experimental data or a priori. The purpose of this paper is presentation of 12 canal control measured complex that realized modern experimental methods in definition of parameters gases and radiative convective heat transfer and given reliable experimental data. Experimental data received with this complex may present base of data for control of equivalent mathematical models used by designers dinnin designing of marine diesel engines.

**Key words:** particles of soot, test, precipitately surface, combustion chamber, marine diesel, electronic microscope.

**For citation:** Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina, Control measured complex for the investigation of parameters of operation process and radiative convection heat transfer in the combustion chamber of a marine high speed diesel engine 2022. № 2 part 1. P. 73—78

## Введение

Сокращение сроков процесса доводки новых образцов судовых дизелей все еще остается актуальной проблемой. Такое положение объясняется главным образом несовершенством математических моделей, используемых конструкторами при проектировании. Это приводит к существенным расхождениям расчетных и экспериментальных данных, получаемых на доводочных стендах. По отдельным параметрам, например, по локальным тепловым потокам, передаваемым от рабочего тела к деталям камеры горения (КС), упомянутые расхождения составляют 25 – 50%. Это не позволяет на стадии проектирования с достаточной точностью задать граничные условия и влечет за собой значительное увеличение сроков экспериментальной доводки новых образцов судовых дизелей. Как отмечено в [1] даже при использовании современных программных комплексов, в которых реализуются весьма сложные с физической точки зрения математические модели, требуется задавать некоторые параметры априори или пользоваться существующими экспериментальными данными. В связи с этим использование и совершенствование контрольно-измерительных комплексов, реализующих современные экспериментальные методики по определению параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена и

позволяющих получать достоверные экспериментальные данные представляется весьма актуальной проблемой. В настоящей статье представлен оригинальный контрольно-измерительный комплекс, созданный при непосредственном участии авторов.

### Двенадцати канальный измерительный комплекс для определения параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в КС судового высокогооборотного дизеля

Принципиальная схема названного выше комплекса представлена на рис.1.

Во время испытаний дизеля на ленте осциллографа Н-115 или на магнитограмме регистрируются следующие параметры [2]:

Особенность этого датчика состоит в том, что грибок толкателя на форсунке заменен на латунный со стержнем, на котором закреплен ферромагнитный стаканчик. Длина стаканчика 5 мм, длина чувствительного элемента 10 мм, датчик имеет линейную характеристику во всем диапазоне перемещения иглы форсунки. Он подключается к тензостанции УТ4-1 через согласующее устройство; 3 – давление топлива перед форсункой измеряется датчиком ДДИ-20 диапазона 8 с давлением измеряемой среды порядка 30 МПа.

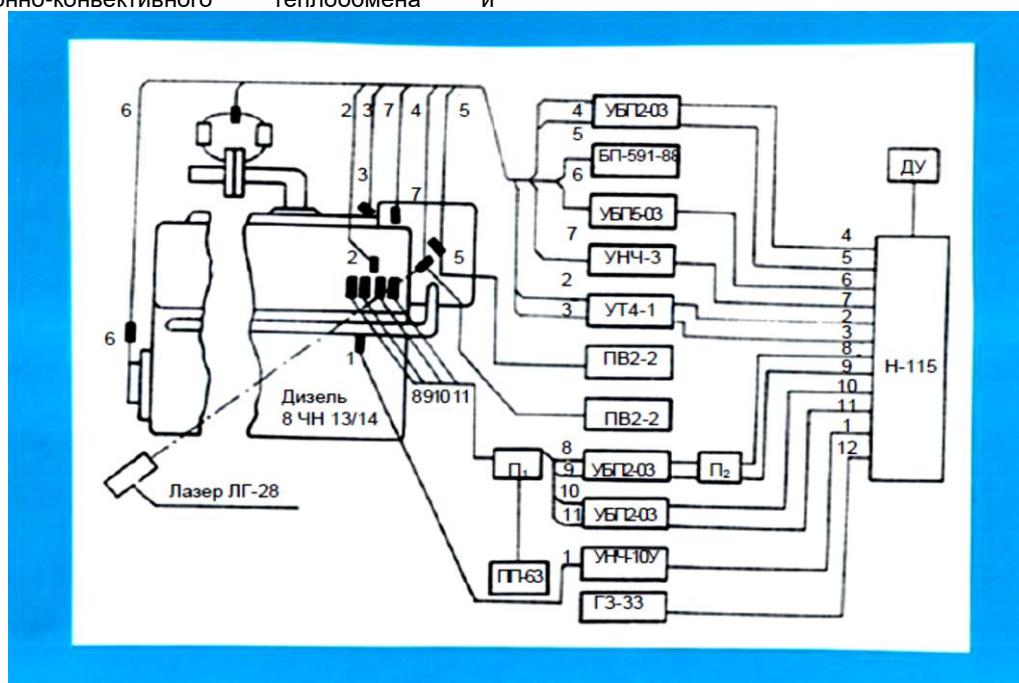


Рис. 1. Принципиальная схема контрольно-измерительного комплекса для определения параметров рабочего процесса и локального теплообмена в КС судового дизеля

1 – давление газов в цилиндре; 2 – подъем иглы форсунки; 3 – давление топлива перед форсункой; 4 – интенсивность свечения пламени на длине волны  $\lambda_1 = 0,397 \text{ мкм}$ ; 5 – интенсивность свечения пламени на длине волны  $\lambda_2 = 0,634 \text{ мкм}$ ; 6 – отметки углов поворота коленчатого вала через 10 градусов и отметка верхней мертвоточки; 7 – частота вращения ротора турбокомпрессора; 8, 9, 10, 11 –

колебания температуры на поверхности крышки цилиндров; 12 – отметки времени.

Перечисленные выше параметры регистрируются по следующим каналам: 1 – давление газов в КС измеряется пьезокварцевым датчиком ПД-100 в комплекте с усилителем УНЧ-10У. Датчик имеет водяное охлаждение и соединен с полостью КС каналом диаметром 5 мм, возможно минимальной длины порядка 25 мм. Это позволяет

производить запись измерения давления в цилиндре дизеля практически без искажений; 2 – подъем иглы форсунки регистрируется дифференциальным датчиком перемещения ИПИ конструкции ЦИТА.

Его характеристика имеет небольшую нелинейность (не более 3%) в интервале 5 – 10 МПа и далее она линейна до 50 МПа. Сигнал от датчика поступает на тензостанцию УТ 4-1; 4, 5 – по этим каналам регистрируется интенсивность свечения пламени на двух длинах волн ( $\lambda_1=0,397$  мкм и  $\lambda_2=0,634$  мкм), параллельно на длине волн  $\lambda_2=0,630$  мкм производится измерение относительной концентрации сажи в КС с помощью лазера ЛГ-28. Подробно метод определения температуры пламени и концентрации частиц сажи рассмотрен во втором разделе настоящей статьи; 6 – отметки углов поворота коленчатого вала через 10 градусов и отметка верхней мертвой точки (ВМТ) регистрируются фотоэлектрическим датчиком. Для этого на шкиве привода вентилятора закреплен светонепроницаемый диск диаметром 150 мм с прорезями через 10 градусов и увеличенной прорезью, соответствующей положению поршня в восьмом (исследуемом) цилиндре в ВМТ. Угловая погрешность прорезей составляет  $\pm 0,5$  градуса. Осветителем является светодиод АЛ-102Б, приемником – фотодиод ФД-ЗК. Фотодиод работает в генераторном режиме, сигнал с него поступает на усилитель УБП 2-03. Светодиод питается от источника БП 591-88, отрегулированного на напряжение 4,2 В. После светодиода и перед фотодиодом находится щелевые диафрагмы; 7 – частота вращение ротора турбокомпрессора регистрируется индуктивным датчиком оригинальной конструкции, сигнал от которого подается на усилитель УНЧ-3. Датчик оформлен в немагнитном (латунном) корпусе аэродинамической формы, что практически не вызывает роста сопротивления на входе в турбокомпрессор; 8, 9, 10, 11 – по этим каналам сигналы от поверхностных термоприемников, установленных в крышке восьмого (исследуемого) цилиндра через переключатель П1 поступают либо на потенциометр ПП-63, либо на усилитель УБП 2-03; 12 – сигналы от генератора звука ГЗ-33 напрямую поступают на шлейфный осциллограф типа Н-115 или на магнитограф.

Рассмотренная схема измерений (см. рис. 1) позволяет с помощью одного и того же поверхностного термоприемника и на одном режиме работы дизеля регистрировать в исследуемой точке поверхности крышки цилиндров как колебания температуры, так и стационарную (среднюю) температуру. Для этого используется блок переключателей П1. Такая схема измерений обладает важным преимуществом по сравнению со схемами, в которых предусмотрена регистрация только колебаний температуры [3], ибо для обработки осцилограмм необходимо знать среднюю температуру поверхности в месте установки термоприемника [2, 4]. Наличие в составе измерительного комплекса необходимого количества усилителей УБП 2-03 позволяет вести запись температурных колебаний одновременно в течение одного и того же рабочего цикла во всех четырех точках, в которых установлены поверхностные термоприемники. Все соединения в схеме измерения

колебаний температуры выполнены экранированными проводами с целью уменьшения посторонних помех. Переменные сигналы от поверхностных термоприемников усиливаются стандартным усилителем типа УБП 2-03 конструкции СКТБ «Биофизприбор» (г. Санкт-Петербург). Он состоит из собственно усилителя, калибратора, индикатора и блока питания. Указанный прибор работает от сети переменного тока частотой 50 Гц с номинальным напряжением 220 В при отклонении от номинала  $\pm 10\%$ .

Применение в системе измерительного комплекса усилителей УБП 2-03 позволяет надежно производить запись колебаний температуры, начиная с 0,08 градуса (при величине термоЭДС железоникелевых термоприемников  $\approx 30$  мкВ/°C с погрешностью 5%, равной погрешности калибровочного напряжения. Регистрация кривой колебаний температуры производится на бумагу светолучевого 12 канального осциллографа Н-115 с помощью гальванометров типа М014-1200. Основным в системе соединений измерительного комплекса является кабель, содержащий 36 экранированных жил (кабель управления), разведенный на концах в отрезки по 2,5 м, распаянных во вставки 2РМ на 4 контакта. Все датчики снабжены ответными стандартными колодками. В реализованной схеме, показанной на рис.1 длина кабеля управления составляет 9,5 м. Такая единная кабельная система позволяет значительно уменьшить помехи от вибраций и сети переменного тока, ускоряет монтаж и демонтаж датчиков. Комплект соединительных проводов дает возможность подключать выходы кабеля к любому из приборов, входящих в состав измерительного комплекса.

#### Элементы измерительного комплекса, реализующие методику двухканального оптического индицирования цилиндра судового дизеля

Принципиальная схема, содержащая элементы измерительного комплекса для реализации этой методики показана на рис. 2.

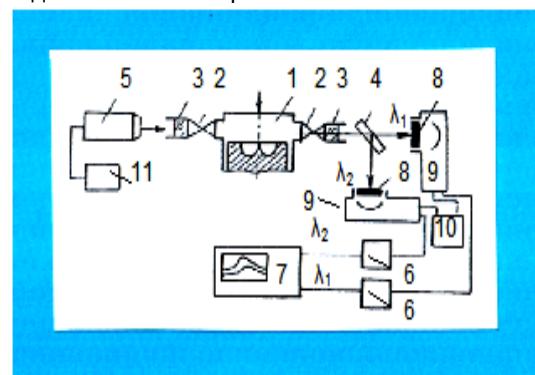


Рис. 2. Принципиальная схема двухканального оптического индицирования цилиндра дизеля: 1 – камера сгорания; 2 – разоблащающее устройство; 3 – кварцевое окно; 4 – полупрозрачное зеркало; 5 – газовый лазер ЛГ-28; 6 – усилители; 7 – шлейфный осциллограф Н-115; 8 – светофильтры; 9 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-22 – приемник излучения; 10 – источник питания; 11 – стабилизатор тока СПБ-5

Представленная на рис. 2 схема реализует методику, позволяющую определять температуру пламени в КС дизеля по величине отношения спектральных интенсивностей его излучения на двух выбранных участках спектра ( $\lambda_1=0,397 \text{ мкм}$  и  $\lambda_2=0,634 \text{ мкм}$ ), т.е. в видимой области спектра. Подробные аналитические соотношения, раскрывающие физическую сущность этой методики представлены в [2, 5 – 10].

В основу методики определения концентрации частиц сажи в цилиндре дизеля положена гипотеза Бугера – Беера, которую запишем в виде [11]:

$$J''_{\lambda} / J'_{\lambda} = \exp(-\mu k_{\lambda} L), \quad (1)$$

где  $J'_{\lambda}$ ,  $J''_{\lambda}$  – спектральная интенсивность светового потока от постороннего источника соответственно на входе в пламя и после прохождения им пламени;  $\mu$  – концентрация частиц сажи в цилиндре дизеля;  $k_{\lambda}$  – спектральный коэффициент ослабления;  $L$  – эффективная длина пути луча.

Обозначив через  $M$  величину  $1/(k_{\lambda} L)$  и выполнив в (1) простые преобразования, получим уравнение для относительной безразмерной концентрации сажи в КС дизеля:

$$\bar{\mu} = \ln \frac{J'_{\lambda}}{J''_{\lambda}}. \quad (2)$$

Величина поглощения светового потока от лазера (см. рис. 2) при прохождении его через пламя в КС определяется по результатам регистрации интенсивностей потоков излучения при трех условиях [2]:

1. Двигатель не работает, лазер включен. В этом случае регистрируется интенсивность излучения собственно лазера после прохождения света через два кварцевых окна в КС  $J_L$ , ей соответствует ордината на осциллограмме  $h_L$ ;

2. Двигатель работает, лазер включен. При этом регистрируется суммарное излучение пламени и частично поглощенное пламене и излучение лазера  $J_{L+n}$ , соответственно на осциллограмме  $h_{L+n}$ ;

3. Двигатель работает, лазер выключен. Производится регистрация интенсивности излучения собственно пламени  $J_n$ , ордината на осциллограмме  $h_n$ .

Переходя к указанным выше ординатам на осциллограммах в миллиметрах, относительную величину безразмерной концентрации сажи в КС дизеля можно определить по зависимости [2]:

$$\bar{\mu} = \ln \frac{h_L}{h_{L+n} - h_n}. \quad (3)$$

Проведенная одним из авторов статьи серия градировочных опытов [2] позволила получить величину  $M = 2,44 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{м}^3 / (\text{ед.}\bar{\mu})$ , которая дает возможность определить действительную концентрацию сажи в КС по формуле:

$$\mu = M \cdot \bar{\mu} \quad (4)$$

#### Устройство для отбора частиц сажи из КС судового дизеля

Общий вид устройства и его детали представлены на рис. 3 и 4. Детали устройства

изготовлены из стали 45 [12]. Следует отметить, что большинство судовых дизелей оборудовано каналами для снятия индикаторных диаграмм. Это облегчает доступ в КС и позволяет использовать индикаторный канал как тракт для отбора частиц сажи.

После того как устройство смонтировано на судовом дизеле (это осуществляется с помощью накидной гайки 4, см. рис. 4), непосредственно методика отбора частиц сажи сводится к следующему:

1. Дизель запускается и прогревается до рабочего состояния, при этом индикаторный кран закрыт;

2. Отбор проб частиц сажи производится при работе судового дизеля по стандартной нагрузочной характеристике. На каждой ее «точке» отбор частиц сажи на осадительную поверхность (стеклянную пластинку) осуществляется не менее 5 раз, при этом время открытия индикаторного крана составляет 2 – 3 с, что соответствует отбору частиц сажи примерно за 10 – 15 рабочих циклов для четырехтактного судового дизеля с частотой вращения коленчатого вала 500 мин<sup>-1</sup> (8,3с<sup>-1</sup>) – дизель 6ЧН 24/36;

3. Стеклянные пластиинки с осевшими на них частицами сажи используются далее для определения оптических характеристик частиц сажи с помощью сканирующего электронного микроскопа с высокой разрешающей способностью S 5500 Hitachi, Japan [13].



Рис. 3. Общий вид устройства для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36



Рис. 4. Детали устройства для отбора проб частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36:  
1 – цилиндрическая насадка с отверстием диаметром 1мм; 2 и 3 – сопла (основное и запасное) с входным диаметром 8 мм и выходным диаметром 1,7мм;  
4 – накидная гайка для крепления устройства на индикаторный канал дизеля

Общий вид указанного микроскопа и его электронной пушки показаны на рис. 5 и 6. Полученные с его помощью результаты по оптическим характеристикам частиц подробно проанализированы и представлены в [13]. Рассмотренный в статье контрольно-измерительный комплекс имеет большие возможности для своего дальнейшего совершенствования. В частности, запись, регистрируемых параметров можно вести через соответствующий интерфейс непосредственно на персональный компьютер [14, 15]. Использование в составе указанного комплекса «интеллектуальных» датчиков со встроенными аналого-цифровыми преобразователями [16] также весьма существенно расширяют его возможности, в том числе и в плане дистанционного управления процессами регистрации измеряемых параметров.



Рис. 5 .Общий вид сканирующего электронного микроскопа S 5500 Hitachi, Japan



Рис. 6. Общий вид электронной пушки сканирующего электронного микроскопа S 5500

### Заключение

Представленный в статье оригинальный контрольно-измерительный комплекс позволяет в течение одного цикла измерять 12 основных параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена. Эта дает возможность повысить качество проведения экспериментальных исследований и глубину раскрытия физики газодинамических и тепловых процессов, протекающих в КС судовых дизелей.

Отмеченное будет способствовать сокращению сроков доводки новых и модернизации уже существующих моделей судовых дизелей и созданию надежной базы данных для проверки адекватности математических моделей указанных выше процессов.

### Литература

1. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А. Трехмерное моделирование нестационарных теплофизических процессов в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 85 с.
2. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей – Владивосток: Дальнаука, 2000, 221 с.
3. Розенблит Г.Б. Теплопередача в дизелях. М.: Машиностроение, 1977, 216 с.
4. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 472с.
5. Дьяченко Н.Х., Батурин С.А., Ложкин В.Н. Экспериментальное исследование температуры сажистого пламени четырехтактных дизелей // Исследование рабочего процесса и систем быстроходных дизелей. Барнаул, 1976, Вып. 3(58), С. 17 – 25.
6. Дьяченко Н.Х., Батурин С.А., Ложкин В.Н. Исследование температуры и излучательной способности турбулентного сажистого пламени в циклических процессах сгорания // Труды ЛПИ, 1977, № 358, С. 96 – 100.
7. Куинн Т. Температура .М.: Мир, 1985, 448 с.
8. Гордов А.Н, Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992, 304 с.
9. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Технотехнические измерения и приборы. М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 460 с.
10. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003, 822 p.
11. Ключников А.Д., Иванцов Г.П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках. М.: Энергия, 1970, 400 с.

12. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Метод осадительной поверхности и устройство для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля// Научные труды Дальрыбвтуза, 2018. Т.46, №3, с. 33 – 41.
13. Руднев Б.И., Куряный В.Г., Повалихина О.В. Экспериментальное исследование оптических параметров иnanoструктур частиц сажи дизельного двигателя//Тепловые процессы в технике, 2016, Т.8, №9, С. 416 – 422.
14. Никитюк Н.М. Микропроцессы и микро-ЭВС. Применение в приборостроении и научных исследованиях. М.: Энергоиздат, 1981, 168 с.
15. Како Н., Яманэ Я. Датчики и микро-ЭВМ. Л.: Энергоатомиздат, 1986, 120 с.
16. Гнатек Ю.Р. Справочник по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям. М.: Радио и связь, 1982, 552 с.

#### References

1. Kavtaradze R.Z., Onišenko D.O., Zelencov A.A. Trehmernoe modelirovaniye nestacionarnykh teplofizicheskikh processov v poršnevyyh dvigatelâh [Three dimension modeling non-stationary heat-physical of processes in piston of engines] M.: Izd-vo MGTU im. N.È. Baumana, 2012. – 85 s.
2. Rudnev B.I. Processy lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniâ dizelej [Processes local heat transfer in diesel combustion chamber]. Vladivostok: Dal'nauka, 2000, 221 s.
3. Rozenblit G.B. Teploperedacha v dizelej [Heat transfer in diesel]. M.: Mašinostroenie, 1977, 216 s.
4. Kavtaradze R.Z. Lokal'nyj teploobmen v poršnevyyh dvigatelâh [Local heat transfer in piston of engines]. M.: Izd-vo MGTU im. N.È. Baumana, 2007, 472s.
5. D'âčenko N.H., Baturin S.A., Ložkin V.N. Èksperimental'noe issledovanie temperatury sažistogo plameni četyrehtaktnykh dizelej [Experimental investigation of soot flame temperature four-tact of diesels // Issledovanie rabočego processa i sistem bystrohodnyh dizelej. Barnaul, 1976, Vyp. 3(58), S. 17 – 25.
6. D'âčenko N.H., Baturin S.A., Ložkin V.N. Issledovanie temperatury i izlučatel'noj sposobnosti turbulentnogo sažistogo plameni v ciklicheskih processa sgoraniâ [Investigation of temperature and radiation of capacity turbulent soot of flame in cycle processes of combustion] // Trudy LPI, 1977, № 358, S. 96 – 100.
7. Kuinn T. Temperatura. [Temperature] .M.: Mir, 1985, 448 s.
8. Gordov A.N., Žagullo O.M., Ivanova A.G. Osnovy temperaturnykh izmerenij. [Bases temperature of measurements]. M.: Ènergoatomizdat, 1992, 304 s.
9. Ivanova G.M., Kuznecov N.D., Čistâkov V.S. Teplotehničeskie izmereniâ i pribory [Thermal-technics measurements and apparatuses]. M.: Izdatel'skij dom MËI, 2007, 460 s.
10. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003, 822 p.
11. Klûčnikov A.D., Ivancov G.P. Teploperedacha izlučeniem v ognetechničeskikh ustankovkah [Radiative heat transfer in fire-technics of devices]. M.: Ènergiâ, 1970, 400 s.
12. Rudnev B.I., Povalihina O.V. Metod osaditel'noj poverhnosti i ustrojstvo dlâ otbora častic saži iz kamery sgoraniâ sudovogo dizelej [Method precipitate of surface and device for collecting soot particles from marine diesel combustion chamber] // Naučnye trudy Dal'rybvtusa, 2018. Т.46, №3, с. 33 – 41.
13. Rudnev B.I., Kurâvýj V.G., Povalihina O.V. Èksperimental'noe issledovanie optičeskikh parametrov i nanostruktur častic saži dizelej [Experimental investigation optic of parameters and nano-structures soot particles of diesel engine] //Teplovye processy v tehnike, 2016, Т.8, №9, С. 416 – 422.
14. Nikitûk N.M. Mikroprocessy i mikro-ÈVS. Primeneñie v priborostroenii i naučnyh issledovaniâh [Micro-processors and micro-electronic computer. Employment in apparatus-construction and scientific of investigations]. M.: Ènergoizdat, 1981, 168 s.
15. Kako N., Åmanè Å. Datčiki i mikro-ÈVM [Apparatuses and micro-electronic computer].L.: Ènergoatomizdat, 1986, 120 s.
16. Gnatek Û.R. Spravočnik po cifro-analogovym i analogo-cifrovym preobrazovatelâm [Handbook about numerical-analogy and analogy-numerical of transformers]. M.: Radio i svâz', 1982, 552 s.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Борис Иванович Руднев**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52б, e-mail: [povalichina@mail.ru](mailto:povalichina@mail.ru)

**Boris I. Rudnev**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: [povalichina@mail.ru](mailto:povalichina@mail.ru)

**Ольга Владимировна Повалихина**, доцент, доцент кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52б, e-mail: [povalichina@mail.ru](mailto:povalichina@mail.ru)

**Olga V. Povalikhina**, assistant professor, assistant professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: [povalichina@mail.ru](mailto:povalichina@mail.ru)

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.12.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.01.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.03.2022.

**Научная статья**

УДК 621.914

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.010>

**Разработка стенда для исследования характеристик демпферов крутильных колебаний судовых валопроводов**

Ю.А. Лапин<sup>1</sup> [yuralapin.98@mail.ru](mailto:yuralapin.98@mail.ru), А.М. Ханнанов<sup>1</sup> [hanr@mail.ru](mailto:hanr@mail.ru), О.С. Портнова<sup>1</sup> [olesya.portnova@mail.ru](mailto:olesya.portnova@mail.ru),

A

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет

B

**Аннотация.** В статье приводится решение задачи по созданию экспериментального стенда для исследования крутильных колебаний судовых валопроводов, с возможностью изучения влияния упругих элементов в составе валолинии на крутильные колебания. Описанный в данной статье стенд также позволяет изучать демпферы крутильных колебаний судовых валопроводов. Основное направление научных исследований, которые будут проводиться на данном стенде направлено на изучение и уменьшение влияния основных недостатков, встречающихся при эксплуатации силиконовых демпферов крутильных колебаний. В настоящей статье приводятся результаты классического расчёта, численного эксперимента с применением CAD программ, а также физического эксперимента, направленных на определение динамических характеристик разработанного стенда. Для того, чтобы в общих чертах ознакомить читателя с существующими проблемами и направлениями исследований в области силиконовых демпферов крутильных колебаний, в статье также приведено краткое описание основных недостатков, присущих силиконовым демпферам крутильных колебаний судовых валопроводов.

**Ключевые слова:** Крутильные колебания, демпферы крутильных колебаний, судовая энергетическая установка.

**Для цитирования:** Лапин Ю.А., Ханнанов А.М., Портнова О.С., Куренский А.В. Разработка стенда для исследования характеристик демпферов крутильных колебаний судовых валопроводов. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 79—82

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.010>

**Development of a laboratory-scale plant for the study of the characteristics of torsional vibration dampers of ship shaft lines.**

Yury A. Lapin<sup>1</sup> [yuralapin.98@mail.ru](mailto:yuralapin.98@mail.ru), Andrei M. Hannanov<sup>1</sup> [hanr@mail.ru](mailto:hanr@mail.ru),

Olesya S. Portnova<sup>1</sup> [olesya.portnova@mail.ru](mailto:olesya.portnova@mail.ru), Alexey V. Kurenskiy<sup>1</sup> [kurenskiy.av@dvgfu.ru](mailto:kurenskiy.av@dvgfu.ru),

<sup>1</sup>Far Eastern Federal University

**Abstract.** The article provides a solution to the problem of creating an experimental unit for the study of torsional vibrations of ship's shaft lines, with the possibility of studying the influence of elastic elements in the structure of the shaft line on torsional vibrations. The experimental unit described in this article also allows studying the dampers of torsional vibrations of ship shaft lines. The main direction of scientific research that will be conducted at this experimental unit is aimed at studying and reducing the impact of the main disadvantages encountered during the operation of silicone torsional vibration dampers. This article presents the results of a classical calculation, a numerical experiment using CAD programs, as well as a physical experiment aimed at determining the dynamic characteristics of the developed experimental unit. In order to familiarize the reader in general terms with the existing problems and research directions in the field of silicone torsional vibration dampers, the article also provides a brief description of the main disadvantages inherent in silicone torsional vibration dampers of ship shaft lines..

**Key words:** torsional vibrations, torsional vibration dampers, ship power plant.

**For citation:** Yury A. Lapin, Andrei M. Hannanov, Olesya S. Portnova, Alexey V. Kurenskiy, Development of a laboratory-scale plant for the study of the characteristics of torsional vibration dampers of ship shaft lines, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 79—82

**Введение**

Крутильные колебания (КК) упруго массовой системы – опасное явление, заключающееся в том, что все точки системы совершают движение знакопеременного направления по дугам окружностей вокруг неподвижной оси. Опасность данного явления заключается в возможности возникновения резонанса собственных колебаний и периодических моментов, возникающих в судовых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) от давления газов, сил инерции и тяжести движущихся деталей, а

также от некоторых приемников энергии. Так как двигатель внутреннего сгорания, основной источник крутильных колебаний судового валопровода, является наиболее распространённым тепловым двигателем в судовой энергетике ввиду его экономичности, надёжности, удобстве в эксплуатации и высокой степени автоматизации, то исследование крутильных колебаний и методов борьбы с ними остаётся актуальным до сих пор [1].

Основным способом снижения амплитуды колебаний и, соответственно, напряжений в судовом валопроводе, является демпфирование.

Наибольшее распространение получили силиконовые демпферы, в которых энергия крутильных колебаний поглощается трением, возникающим в тонком слое вязкой жидкости. [2].

Силиконовые демпферы просты по конструкции и надёжны в эксплуатации, но при этом имеют и определённые недостатки.

Рассмотрим их более подробно.

1. Невозможность эффективной работы на различных резонансных частотах.

На современных судах, особенно оснащённых высоко и среднеоборотными двигателями внутреннего сгорания могут иметь место несколько критических (резонансных) частот вращения, причём как на одной форме колебаний от разных гармоник дизеля, так и на нескольких формах. Демпфер может эффективно работать только на одной частоте вращения, на которую он и рассчитывается. На остальных частотах это устройство может лишь уменьшить амплитуду на некоторое значение. В связи с этим зачастую приходится назначать запретные зоны частот вращения главного двигателя, что вызывает неудобства при его эксплуатации.

2. Отсутствие возможности регулирования демпфера в случае смещения резонансной частоты при модернизации и ремонте СЭУ.

Этот недостаток схож с предыдущим и связан с неспособностью демпфера работать на частоте отличной от той, на которую он настроен. При модернизации или ремонте СЭУ, а также при аварийных изменениях характеристик крутильно колеблющейся системы (например, отключение одного цилиндра в двигателе) может возникнуть смещение частоты собственных крутильных колебаний и, как следствие, рост напряжений в валу, так как демпфер перестанет эффективно работать [3].

Отличие данного недостатка от предыдущего состоит в том, что в этом случае нет задачи регулировать демпфер на ходу судна, достаточно откорректировать его характеристики в соответствии с новой резонансной частотой, пока двигатель остановлен. Данная проблема актуальна не только для промысловых, но и для транспортных судов. Обычно в этом случае судовладелец после расчёта и неудовлетворительных результатов измерений крутильных колебаний изменённой установки вынужден менять демпфер.

3. Трудности при диагностировании

Демпфер, как и любая деталь в механизме, имеет свойство изнашиваться. Если диагностирование пружинного демпфера заключается в визуальной проверке состояния пружин, а также проверки их жёсткости, то с диагностированием силиконового демпфера возникают трудности [2].

Исследования Покусаева М.Н. [4] показали, что наработка демпфера мало влияет на плотность и вязкость наполнителя и основной вклад в потерю демпфирующих свойств обусловлен потерей наполнителя через неплотности (см рис 3). В той же работе [4] приведены зависимости различных характеристик демпфера от количества наполнителя. В соответствии с этими исследованиями демпфер будет сохранять работоспособность при потере до 60% наполнителя, после чего напряжения в системе начнут расти с

высокой скоростью. Данный фактор затрудняет оценку технического состояния демпфера, так как в случае наличия утечки на протяжении огромного срока эксплуатации демпфера его характеристики будут почти неизменными, а затем он выйдет из строя стремительно и неожиданно.

Вышеперечисленные недостатки требуют проведения комплексных исследований направленных на разработку новых конструкций демпферов крутильных колебаний, а также на совершенствование методик их диагностирования.

Важным аспектом в таких исследованиях является физический эксперимент, который необходимо проводить на специализированном стенде, обеспечивающим получение зависимостей вибрационных характеристик исследуемых крутильно-колеблющихся систем от конструктивных и режимных параметров демпферов различных конструкций при различных внешних периодических воздействиях (возмущениях).

В настоящей работе описывается решение задачи по созданию такого экспериментального стенда.

### Описание стендса

Общий вид стенда показан на рисунке 1.

Для решения поставленных задач, кроме основных элементов крутильно колеблющейся системы, таких как приводной электродвигатель, валы, маховики стенд имеет в своем составе следующие элементы:

- генератор постоянного тока (ГПТ) с нагрузочным блоком, который создает переменную нагрузку путем программного изменения тока якоря;
- место установки демпферов с различными конструктивными особенностями.

Крутильные колебания возбуждаются путем создания переменной нагрузки электрогенератора, что становится источником неравномерности крутящего момента, затрачиваемого на вращение вала.

Генератор постоянного тока имеет постоянное возбуждение магнитной системы, поэтому индуцируемая при вращении вала ЭДС якоря создает в электрической нагрузке нагрузочного блока (на схеме не показан) ток, величина которого прямо пропорциональна моменту на валу.

Электрические переходные процессы протекают значительно быстрее механических, поэтому при постоянстве магнитного потока в генераторе задача генерирования крутильных колебаний сводится к задаче создания периодических изменений тока якоря. Момент на валу, создаваемый генератором, прямо пропорционален току поэтому легко измеряется.

Установлен широтно-импульсный регулятор с мощными полупроводниковыми ключами и система управления, позволяющая задавать частоту, амплитуду и скважность тока якоря. Введение в систему быстродействующего регулятора и отрицательной обратной связи по току позволит реализовать гармоническую и постоянную составляющие тока и соответственно момента нагрузки.

Возможность изменения частоты вынужденных колебаний позволит находить и исследовать резонансные явления в колеблющейся упругой системе.

Создание различных законов изменения момента нагрузки позволяет моделировать различные варианты работы крутильно-колеблющейся системы в составе судовых энергетических установок.

Также для более точного моделирования процессов, происходящих в судовых энергетических установках с двигателями внутреннего сгорания, частоту вынужденных колебаний можно сделать зависимой от частоты вращения стенда при помощи специально установленного таходатчика. Такая настройка нагружочного устройства позволит проводить исследования крутильных колебаний при разгоне и торможении вала, что позволит увидеть характер и скорость развития крутильных колебаний, а также отрабатывать процедуру торсиографирования реального судового валопровода.

В дополнение к вышеуказанным основным задачам, стенд позволяет решать ряд задач в области повышения точности анализа крутильно-колеблющихся систем:

- сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных;
- влияние различных факторов на точность измерений крутильных колебаний (податливых элементов, дисбаланса на маховых массах, величина скорости разгона и торможения двигателя при измерении).

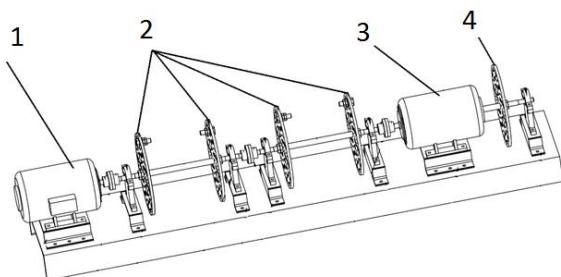


Рис. 1. Стенд для исследования характеристик демпферов крутильных колебаний

1 – генератор постоянного тока; 2 – маховые массы; 3 – электродвигатель; 4 – масса или модельный демпфер (На рисунке вариант с массой).

### Проведение эксперимента

Поскольку физический эксперимент, проводимый с помощью стендса, направлен на изучение влияния демпферов различных конструкций на вибрационные характеристики крутильно-колеблющихся систем, необходимо было предварительно получить его динамические характеристики без демпфера [5,6,7]. Такая характеристика должна стать некоторой опорной зависимостью, относительно которой будет в дальнейшем проводиться сравнительная оценка изучаемых демпферов [6,7].

Эксперимент, направленный на получение такой характеристики, состоял из нескольких этапов:

- расчет динамических характеристик стенда классическим методом. На этом этапе расчёт проводился вручную, с использованием метода цепных дробей Терских.
- численный эксперимент по определению частот и форм собственных крутильных колебаний. Для

выполнения этого этапа была создана трёхмерная модель ротора, после чего проанализирована на частоты и формы собственных колебаний вcad программе при помощи метода конечных элементов

- проведение торсиографирования (физического эксперимента по изучению крутильных колебаний);
- проведение сравнительной оценки расчетных и экспериментальных данных, с целью уточнения разработанной математической модели стенда и дальнейшего использования этой модели при разработке новых конструкций демпферов.

На рис.2 показана модель ротора стенда на момент проведения эксперимента.

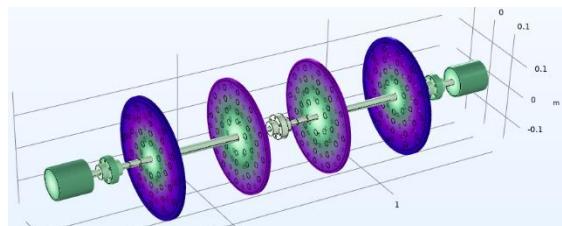


Рис. 2. Модель ротора

### Обсуждение результатов и выводы

В результате расчета получены следующие динамические характеристики стенда (частоты собственных колебаний): 1 узловая форма – 29 Гц, 2-х узловая форма – 71 Гц, 3-х узловая форма – 80,72 Гц, 4-х узловая форма – 170 Гц, 5 узловая форма – 171 Гц.

Измерение крутильных колебаний были проведены с помощью комплекта торсионного виброметра тип 2523 производства компании Брюль и Кьер (Дания). В результате торсиографирования получены экспериментальные данные. Спектр амплитуд показан на рис.3.

Спектральный анализ торсиограммы (рис.3) выявил 1-ю и 2-ю формы собственных колебаний системы (в том числе на нерезонансных режимах). Результаты физического эксперимента совпадают с расчетными данными.

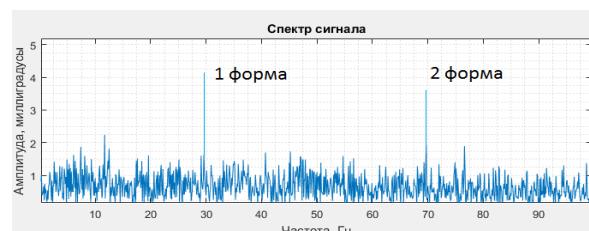


Рис. 3. Спектр амплитуд крутильных колебаний

### Заключение

В лаборатории технической диагностики морской техники ДВФУ разработан экспериментальный стенд для исследования демпферов крутильных колебаний судовых валопроводов.

Получена опорная характеристика стenda, которая будет использоваться при проведении исследований и анализе эффективности разрабатываемых конструкций демпферов крутильных колебаний.

## Литература

- 1 Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий // СПб – Наука, 2007. 276 с.
- 2 Грэзина А.В., Комаров В.Н. О гашении крутильных колебаний в одной механической системе // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 6 (1). С. 185–188. eLIBRARY ID: 21141207.
- 3 Горбачёв М.М. Использование магнитных жидкостей в демпферах крутильных колебаний машинно – движительных комплексах судов. Автореферат // Астрахань: издательство АГТУ, 2018. 19с.
- 4 Покусаев М.Н. Демпфирование КК в валах судовых дизелей: моделирование, экспериментальные и натурные исследования. Автореферат // Астрахань: издательство АГТУ, 2005. 39с.
- 5 Розенблюм М.Я. Способ контроля технического состояния силиконового демпфера / М.Я. Розенблюм, Н.Н. Фомин // [электронный ресурс], (дата обращения 24.06.2021г) <http://www.mortestspb.ru/index.php?s=17640000>
- 6 Приложения к техническому руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. // СПб: издательство РМРС, 2013. 228 с.
- 7 Карпенко Т.Н., Чурляев А.В. К вопросу об определении частот собственных крутильных колебаний многомассовой динамической модели // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2010. № 20. С. 213–216. eLIBRARY ID: 22860436.

## References

1. Efremov L. Computerized analyses of torsional vibration in propulsion units: Theory and practice, monograph. Spb – Science, 2007. 276 p.
2. Grezina A.V., Komarov V.N. The damping of torsional vibrations in one mechanical system // Bulletin of Nizhegorodskiy un-ty name by N.I. Lobachevsky. 2013. No. 6 (1). 185-188p. eLIBRARY ID: 21141207.
3. Gorbachev M. The use of magnetic fluids in torsional vibration dampers in ship propulsion systems. Author's abstract // Astrakhan: AGTU Publishing house, 2018. 19 p.
4. Pokusaev M. Torsional vibration damping in the shafts of marine diesel engines: modeling, experimental and field studies. Author's abstract // Astrakhan: AGTU Publishing house, 2005. 39 p.
5. Rosenblum M., Fomin N. Method for monitoring the technical condition of a silicone damper - 24.06.2021 // URL: <http://www.mortestspb.ru/index.php?s=17640000>
6. Appendices to the technical manual for the technical supervision of vessels in operation. // Spb, Russian Maritime Register of Shipping – 2013, 228 p.
7. Karpenko T.N., Churlyaev A.V. The question of determining the frequencies of natural torsional vibrations of a multi-mass dynamic model // Vestnik Priazovskiy state un-ty. Technical science. 2010. No. 20. 213–216 p. eLIBRARY ID: 22860436.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Юрий Алексеевич Лапин**, ведущий инженер отделения Машиностроения, морской техники и транспорта Дальневосточный федеральный университет Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., е-mail: [yuralapin.98@mail.ru](mailto:yuralapin.98@mail.ru)

**Андрей Мусавирович Ханнанов**, кандидат технических наук, доцент отделения Машиностроения, морской техники и транспорта Дальневосточный федеральный университет Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., е-mail: [hanr@mail.ru](mailto:hanr@mail.ru)

**Олеся Сергеевна Портнова**, кандидат технических наук, старший преподаватель отделения Машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., е-mail: [olesya.porthnova@mail.ru](mailto:olesya.porthnova@mail.ru)

**Алексей Владимирович Куренский**, кандидат технических наук, доцент отделения Машиностроения, морской техники и транспорта Дальневосточный федеральный университет Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс,

**Yury A. Lapin**, lead engineer, Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: [yuralapin.98@mail.ru](mailto:yuralapin.98@mail.ru)

**Andrei M. Hannanov**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: [hanr@mail.ru](mailto:hanr@mail.ru)

**Olesya S. Portnova**, Ph.D. (Eng), Senior professor Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, Russia, e-mail: [fershalovjuriy@mail.ru](mailto:fershalovjuriy@mail.ru)

**Alexey V. Kurenskiy**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: [kurenskiy.av@dvgfu.ru](mailto:kurenskiy.av@dvgfu.ru)

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.12.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.02.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2022.

**Научная статья**

УДК 621.165.533

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.011>

## **Особенности профилирования лопаточного аппарата малорасходных турбин с большим углом поворота потока**

С.В. Чехранов<sup>1</sup> [turboroom@yandex.ru](mailto:turboroom@yandex.ru) Р.Р. Симашов<sup>1</sup> [forsimashov@yandex.ru](mailto:forsimashov@yandex.ru)

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

**Аннотация** В работе представлены результаты экспериментальных исследований плоских решеток профилей с большим углом поворота потока. Представленные результаты являются продолжением исследований структуры потока в криволинейных каналах постоянного сечения с углом поворота 167 градусов. Рабочие колеса с таким лопаточным аппаратом входят в состав малорасходных турбин конструкции ЛПИ. Поскольку при исследовании единичных каналов большой изогнутости выявлены обширные зоны отрыва пограничного слоя, то в исследованиях ставилась задача определения способа профилирования плоской решетки профилей, ограничивающего влияние отрыва на потери кинетической энергии в решетке. Исследовались три решетки профилей с относительной высотой решеток  $I/B = 0,44; 0,58$  и  $0,87$ . Относительный шаг соответственно:  $t/B = 1,23; 1,63$  и  $2,45$ . Для измерения статического давления по обводу профилей лопатки дренировались. А для измерения углов выхода потока из решетки производилось траверсирование потока. Результатом исследований явились рекомендации по удлинению выходной кромки до четырех калибров, что снизило потери в решетке на 3%.

**Ключевые слова:** Малорасходные турбины, криволинейные каналы, отрыв потока, пограничный слой, решетка профилей

**Для цитирования:** Чехранов С.В., Симашов Р.Р. Особенности профилирования лопаточного аппарата малорасходных турбин с большим углом поворота потока. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 83—87.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.011>

## **Features of profiling of low-consumption turbines blading with a large angle of flow rotation**

Sergei V. Chekhranov<sup>1</sup> [turboroom@yandex.ru](mailto:turboroom@yandex.ru), Rafail R. Simashov<sup>1</sup> [forsimashov@yandex.ru](mailto:forsimashov@yandex.ru)

<sup>1</sup>Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract** The paper presents the results of experimental studies of plane cascades with a large angle of flow rotation. The presented results are a continuation of studies of the flow structure in curvilinear channels of constant cross-section with a rotation angle of 167 degrees. Running wheels with such a blading are part of low-consumption turbines of the LPI design. Since the study of single channels with a large curvature revealed extensive zones of separation of the boundary layer, the research task was to determine the method of profiling a plane cascade, limiting the effect of separation on the motional energy loss in the cascade. Three cascades with a relative height  $I/B = 0.44; 0.58$  and  $0.87$  were investigated. The relative step, respectively:  $t/B = 1.23; 1.63$  and  $2.45$ . To measure the static pressure along the contour of the profiles, the blades were drained. And to measure the angles of the flow out of the cascade, the flow was traversed. The research resulted in recommendations for lengthening the trailing edge up to four calibers, which reduced the loss in the cascade by 3%.

**Key words:** low-consumption turbines, curvilinear channels, flow separation, boundary layer, cascade

**For citation:** Sergei V. Chekhranov, Rafail R. Simashov Features of profiling of low-consumption turbines blading with a large angle of flow rotation. Marine intellectual technologies2022. № 2 part 1. P. 83—87.

### **Введение**

Понятие малорасходности тесно связано с понятием малоразмерности, но это не одно и то же, хотя МРТ, как правило, делаются малоразмерными. В свою очередь под малоразмерными понимаются такие турбины, у которых геометрические размеры лопаток и их кромок соизмеримы с величиной зазоров в проточной части ступени. Как отмечалось еще в работах А.С. Наталевича [1], у таких турбин толщина пограничного слоя становится значимой величиной, влияющей на характер течения в межлопаточных каналах. Это обстоятельство и вызывает необходимость самостоятельного

исследования газодинамических процессов, происходящих в малорасходных турбинах.

Одной из перспективных конструкций являются турбины, известные как МРТ конструкции ЛПИ [2], созданные коллективом под руководством И.И. Кириллова. Особенность этих МРТ заключается в том, что геометрический угол установки сопел выполняется в пределах  $3\dots 5^{\circ}$ . При оптимальных значениях характеристического числа  $u/c_1$  угол поворота потока в рабочем колесе превышает  $165^{\circ}$ , а относительный шаг лопаток рабочего колеса (РК) становится существенно больше 1,0. Однако малый угол установки сопел приводит к "растягиванию" длины косого среза сопла и существенно увеличивает степень парциальности, уменьшая

потери на вентиляцию и компенсируя потери от неоптимальности геометрических параметров. В то же время сам факт неоптимальности параметров делает очень актуальными исследования газодинамических процессов в межлопаточных каналах таких турбин с целью уменьшения потерь кинетической энергии, вызванных этой неоптимальностью.

### 1. Геометрические характеристики решеток профилей

Исследования единичных криволинейных каналов большой изогнутости [3, 4] показали наличие в них развитого отрыва пограничного слоя. Поэтому исследование межлопаточных каналов с такими же характеристиками может определить направление совершенствования проточной части ступеней МРТ.

Таким образом, для исследования были выбраны три решетки профилей со следующими геометрическими характеристиками: угол изогнутости межлопаточного канала  $\theta=167^\circ$ ; относительная высота решеток  $I/B = 0,44; 0,58$  и  $0,87$ . Относительный шаг соответственно:  $t/B = 1,23; 1,63$  и  $2,45$  при радиусах кривизны вогнутой стенки профиля  $32$  мм,  $24$  мм и  $16$  мм. Все решетки выполнены с межлопаточными каналами постоянной ширины, т.е., со степенью конфузорности, равной  $1,0$ . Профиль лопаток образован окружностями, сопряженными лемнискатами с прямыми линиями. Кромки лопаток короткие. Данные характеристики соответствуют натурной турбине с веерностью лопаток  $I/D_{cp} = 0,112$ .

Турбины с такими характеристиками многие исследователи относят к типу "канальных" турбин, поскольку для повышения их КПД требуется профилировать не столько лопатки, сколько межлопаточные каналы РК. В данном случае так же учитывались результаты исследования единичных каналов с тем же углом поворота и теми же радиусами кривизны, где четко прослеживался развитый отрыв пограничного слоя. Поэтому главной задачей данного исследования являлась разработка мер по локализации отрыва и соответственно по снижению потерь кинетической энергии в рабочем колесе МРТ. Внешний вид решеток представлен на рис. 1.

Поскольку влияние локальных турбулизаторов пограничного слоя на характеристики отрыва исследовались на единичных криволинейных каналах с аналогичными геометрическими характеристиками [3], то для решеток профилей ставилась задача определения влияния кромок. Причем, предполагается, что именно выходные кромки оказывают решающее влияние на формирование отрывных явлений в межлопаточном канале. Здесь уже упоминалось, что турбины с описанными геометрическими характеристиками принято относить к турбинам так называемого "канального типа". Экспериментальные исследования решеток профилей таких турбин должны показать насколько справедливы предложения о внесении канальных методов в методики расчета лопаточного аппарата.

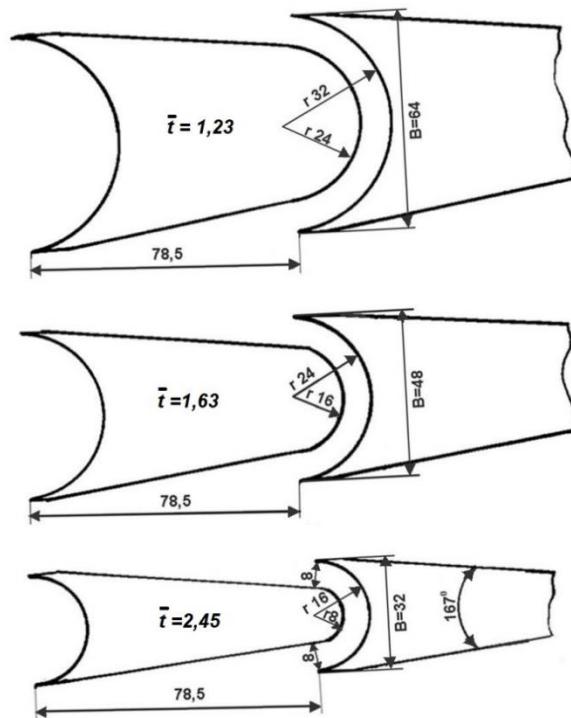


Рис. 1. Исследуемые решетки профилей

### 2. Исследование структуры потока в решетках профилей

Для измерения статического давления по стенкам межлопаточных каналов лопатки были дренированы в соответствии со схемой на рис. 2 на глубину средней высоты лопаток.

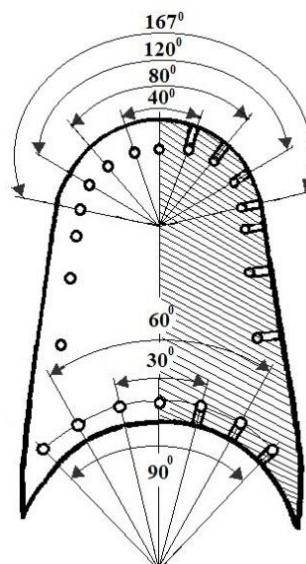


Рис. 2. Схема дренирования лопаток

Для измерения параметров потока в выходном сечении решеток поток траверсировался трехканальным зондом как по шагу, так и по высоте решетки. При этом измерялись углы выхода потока. Режимы течения потока на выходе из решеток поддерживались  $M_{21} = 0,8...0,96$ , что в целом соответствует режимам течения в натурной турбине при оптимальных значениях  $u/c_1$ . Состояние потока

контролировалось по параметру относительного давления:  $P = P_{изб}/P_{атм}$ .

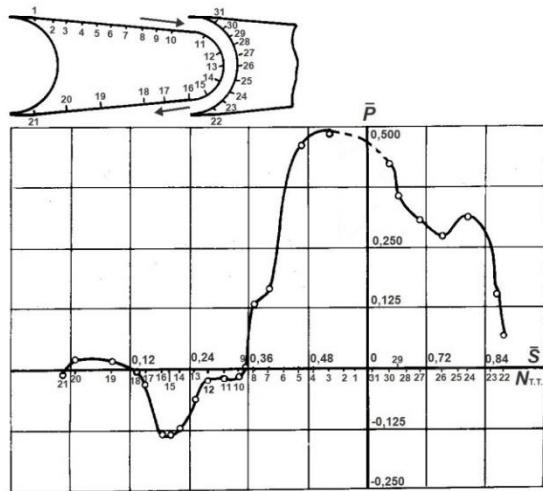


Рис. 3. Распределение относительного давления по профилю с  $t/B = 1,23$ )

Исследования показали, что характер изменения относительного давления по стенкам межлопаточных каналов в целом соответствует характеру изменения в единичных криволинейных каналах. Для сравнения на рис. 3 представлены результаты измерения давления для решетки с  $t/B = 1,23$ . Для других решеток характер изменения давления сходный.

Область отрицательного относительного давления свидетельствует о наличии отрыва на спинке профиля. Причем, чем меньше радиус закругления поворотного участка, тем шире область отрыва, что соответствует аналогичным измерениям в единичных каналах.

Следует отметить, что в решетках с малой относительной высотой  $I/B$  существенное влияние на характер течения потока оказывает не только отрыв пограничного слоя, но и вторичные течения на торцевых стенках межлопаточного канала [5, 6, 7]. И чем протяженнее канал, тем большую долю поперечного сечения канала занимают вторичные вихри по направлению к выходному сечению, сжимая при этом отрывной след. Исходя из этого, представим результаты измерений параметров потока для решетки с наиболее протяженным межлопаточным каналом с  $t/B = 1,23$ .

Отрыв внутри межлопаточного канала отражается не только на потерях энергии, но и на углах выхода потока. Для решетки с  $t/B = 1,23$  с короткими кромками показаны углы выхода потока по шагу и по высоте решетки (рис. 4).

Если учесть, что для всех решеток профилей геометрические углы входа и выхода составляют 6,5 градусов, то из показанных графиков видно, что действительный угол выхода потока существенно больше геометрического. Причем, по высоте решетки наибольшее отклонение наблюдается в средней части, что объясняется развитым отрывом, выходящем за пределы межлопаточного канала. А у торцевых стенок проявляется наглядное воздействие вторичных течений на отрывные явления.

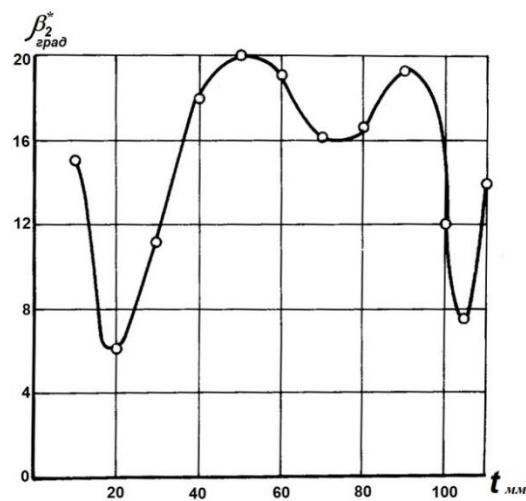


Рис. 4. Распределение углов выхода потока по шагу на выходе из решетки профилей с  $t/B = 1,23$  с короткими кромками

По шагу решетки также наблюдается существенная неравномерность углов выхода потока, особенно в средней части косого среза. С учетом полученных результатов предложено удлинить выходную кромку лопаток до такой величины, которая обеспечивает локализацию отрывной зоны внутри межлопаточного канала. Конкретную величину этого удлинения можно с достаточной надежностью определить по результатам исследования единичных каналов.

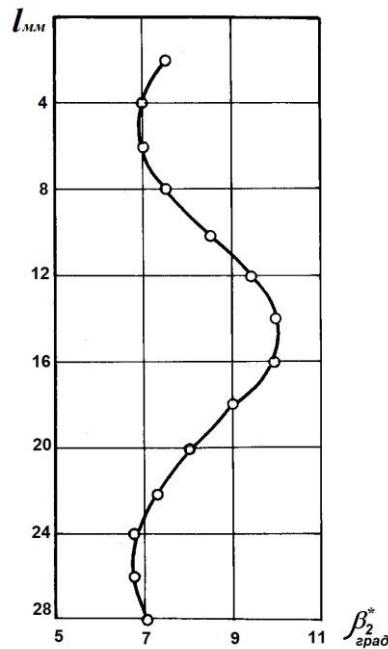


Рис. 5. Распределение углов выхода потока по высоте межлопаточного канала решетки профилей с короткими кромками

Если в качестве определяющего калибра канала принять его ширину, то длина кромки должна быть не менее четырех калибров. Результаты измерения относительного давления по профилю с удлиненными кромками в 4 калибра показаны на рис. 6.

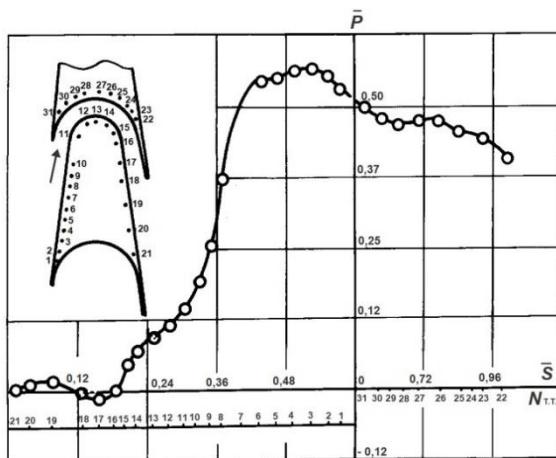


Рис. 6. Распределение относительного давления по профилю с  $t/B = 1,23$  с длинными кромками

Полученное распределение давлений по профилю свидетельствует о почти полном исчезновении зоны отрицательных давлений, причем, именно в области удлиненной кромки. Можно с достаточной долей уверенности говорить о том, что отрыв локализован в "отрывной пузьре", присоединенный к стенке канала, что позволяет сформировать более равномерный поток в косом срезе решетки.

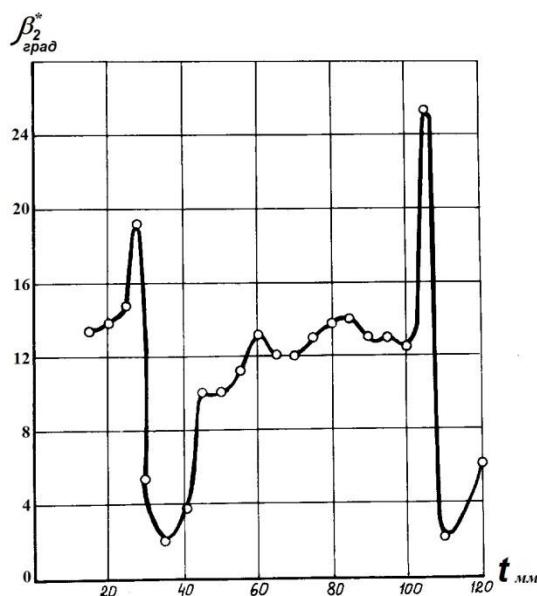


Рис. 7. Распределение углов выхода потока по шагу на выходе из решетки профилей с удлиненными кромками

Еще более четкую картину дает график распределения углов выхода потока по шагу (рис. 7) и по высоте (рис. 8) решетки.

О локализации отрыва можно с достаточной долей уверенности судить по картине распределения углов выхода потока по шагу на выходе из решетки профилей с удлиненными кромками. Если сравнить

характер и величину распределения углов выхода потока в решетке с короткими кромками и в решетке с удлиненными кромками, то отчетливо видно, что по всей длине шага углы заметно уменьшились и стали более равномерными.

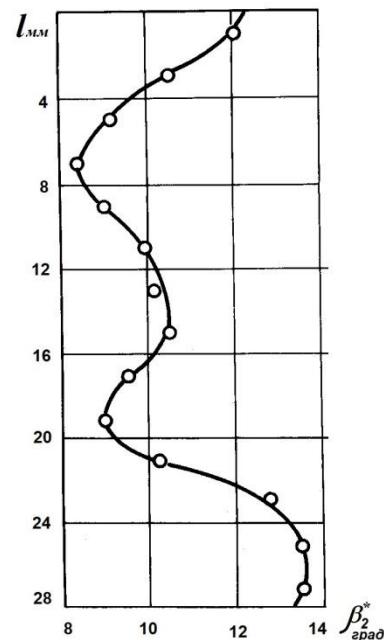


Рис. 8. Распределение углов выхода потока по высоте межлопаточного канала решетки профилей с удлиненными кромками

А это значит, что отрыв перестал выходить за пределы косого среза. Это согласуется и с результатами исследований [8, 9]. В целом можно отметить, что удлиненные кромки существенно выравнивают поток в косом срезе решетки профилей. Угол выхода потока приближается к геометрическому почти по всей длине шага. И самым существенным показателем влияния выходных кромок является численное значение величины потерь кинетической энергии в решетке. Для всех трех решеток удлинение кромок снизило потери на 3% при  $M_{2t} = 0,96$ .

### Заключение

Исследования плоских решеток профилей малорасходных турбин с большим углом поворота потока являются продолжением цикла исследований структуры потока в каналах большой изогнутости. Как для единичных каналов, так и для плоской решетки профилей отмечено преобладающее влияние вторичных течений и отрыва пограничного слоя в поворотном участке канала. Исследования показали, что наибольшее влияние на формирование структуры потока в выходной части решетки профилей является удлинение выходной кромки до четырех калибров поперечного сечения канала. Это решение локализует углы выхода потока и снижает потери кинетической энергии в целом на 3%.

### Литература

1. Наталевич, А.С. Воздушные микротурбины. М.: Машиностроение, 1979. 192с.
2. Рассокин, В.А. Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение. Труды СПбГПУ. 2004. № 491. С. 152-161.
3. Чехранов С.В., Симашов Р.Р. Экспериментальное исследование отрывных течений потока в криволинейных каналах постоянного сечения // Морские интеллектуальные технологии, 2020 №1 том 2, С. 95-99
4. Чехранов С.В., Симашов Р.Р. Экспериментальное исследование структуры газового потока в криволинейных каналах переменного сечения // Морские интеллектуальные технологии, 2020 № 4 том 2, С. 44-48
5. Богомолов Е.Н. О смыкании зон вторичных течений в турбинных решетках и его влияние на концевые потери. Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 1991. №3. С. 25-31.
6. Богомолов Е.Н. Определение концевых потерь в турбинных решетках с учетом влияния входного пограничного слоя. Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 1991. №2. С. 54-60.
7. Дейч М.Е., Лазарев Л.Я., Полникова Т.В. Влияние периодической нестационарности на энергетические характеристики направляющих решеток. Труды МЭИ. 1974. Вып. 203. С. 24-27.
8. Чжен П. Управление отрывом потока. М: Мир, 1979. 552 с.
9. Daniel Wilde., Analysis of Curvature Effects on Boundary Layer Separation and Turbulence Model Accuracy for Circulation Control Applications "California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, 2010.

### References

- 1 Natalevich, A.S. Vozdushnyye mikroturbiny [Air microturbines]. M.: Mashinostroyeniye, 1979. 192c.
- 2 Rassokhin, V.A. Turbiny konstruktsii LPI: Preimushchestva, kharakteristiki, optyr razrabotki i primenie. [LPI design turbines: Advantages, characteristics, development experience and applications] Trudy SP6GPU. 2004. № 491. C.
- 3 Chekhranov S.V., Simashov R.R. Eksperimental'noye issledovaniye otryvnykh techeniy potoka v krivolineynikh kanalakh postoyannogo secheniya [Experimental research of the separate flows in curved line channels of constant section] // Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, 2020 №1 tom 2, S. 95-99
- 4 Chekhranov S.V., Simashov R.R. Eksperimental'noye issledovaniye struktury gazovogo potoka v krivolineynikh kanalakh peremennogo secheniya [Experimental study of the structure of a gas flow in curvilinear channels of variable cross-section] // Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, 2020 № 4 том 2, S. 44-48
- 5 Bogomolov E.N. O smykanii zon vtorichnykh techeniy v turbinnykh reshetkakh i ego vliyanie na kontsevye poteri. [About closing of secondary current zones in turbine grids and its effect on end losses] Izv. VUZov. Aviatsionnaya tekhnika. 1991. №3. S. 25-31.
- 6 Bogomolov E.N. Opredelenie kontsevyykh poter' v turbinnykh reshetkakh s uchetom vliyaniya vkhod-nogo pogranichnogo sloya [Determination of end losses in turbine grids taking into account the influence of the input boundary layer]. Izv. VUZov. Aviatsionnaya tekhnika. 1991. №2. S. 54-60.
- 7 Deych M.E., Lazarev L.Ya., Polnikova T.V. Vliyanie periodicheskoy nestatsionarnosti na energeticheskie kharakteristiki napravlyayushchikh reshetok. [Effect of periodic non-stability on energy characteristics of guide grates] Trudy MEI. 1974. Vyp. 203. S. 24-27.
- 8 Chzhen P. Upravlenie otryvom potoka [Management of a stream separation]. M: Mir, 1979. 552 s.
- 9 Daniel Wilde., Analysis of Curvature Effects on Boundary Layer Separation and Turbulence Model Accuracy for Circulation Control Applications "California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, 2010.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52-б, e-mail: turboroom@yandex.ru

**Sergei V. Chekhranov**, Professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52-b, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: turboroom@yandex.ru

**Рафаиль Равильевич Симашов**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: forsimashov@yandex.ru

**Rafail R. Simashov**, Ph.D. (Eng), Ass. Prof., Ass. Prof. of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.09.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.12.2021.

Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2022.

Научная статья

УДК 662.994: 536.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.012>

## Влияние конструкционных и режимных параметров на тепловые и газодинамические характеристики судового компактного котла-утилизатора

Д.И. Бевза<sup>1</sup>, [bvz.denis@yandex.ru](mailto:bvz.denis@yandex.ru) О.П. Шураев<sup>2</sup>, e-mail: [solwrk@inbox.ru](mailto:solwrk@inbox.ru)

<sup>1</sup>ГЦКБ Речфлота, <sup>2</sup>Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация.** Работа посвящена продолжению исследования судового компактного котла-утилизатора новой конструкции. Исследование проводится с целью изучения влияния режимных и конструкционных параметров разработанного котла-утилизатора на его основные эксплуатационные показатели. Изложенный в статье этап исследования включает описание процесса подготовки, результаты и анализ результатов отсеивающего эксперимента по плану Плакетта-Бермана, проведенного с использованием разработанной и апробированной ранее численной модели теплопереноса и движения газа в каналах компактного котла-утилизатора. Объясняется, каким образом выбираются данные для анализа из полученного множества. Результаты дисперсионного анализа при доверительной вероятности 0,95 позволяют говорить о том, что все выбранные факторы значимы. Оценка значимости факторов по коэффициенту детерминации определяет уровень взаимосвязи между каждым фактором и откликом, а кривые графиков зависимостей «фактор-отклик» качественно подтверждают адекватность этих зависимостей. Исследование показало, что параметры котла-утилизатора, способные оказывать влияние на его эксплуатационные характеристики, выбраны верно, что позволяет начать подготовку к оптимизационному эксперименту. Анализ данных отсеивающего эксперимента подтвердил соответствие моделируемых газодинамических и тепловых процессов физическим процессам, происходящим в котле утилизаторе. Выяснилось, что из всех выбранных факторов наибольшее влияние на перепад давления в кotle-утилизаторе оказывает режимный параметр (изменение скорости теплоносителя), а на выходную температуру теплоносителя – геометрический (изменение длины теплообменной секции).

**Ключевые слова:** компактный котел-утилизатор, теплообменная секция, численное моделирование тепловых и газодинамических процессов, отсеивающий эксперимент.

**Для цитирования:** Бевза Д.И., Шураев О.П. Влияние конструкционных и режимных параметров на тепловые и газодинамические характеристики судового компактного котла-утилизатора, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 88—96.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.012>

## Influence of structural and operating parameters on thermal and gas dynamic characteristics of the vessel's compact exhaust boiler

Denis I. Bevza<sup>1</sup> [bvz.denis@yandex.ru](mailto:bvz.denis@yandex.ru), Oleg P. Shurayev<sup>2</sup> [solwrk@inbox.ru](mailto:solwrk@inbox.ru)

<sup>1</sup>Gorky central design bureau of river fleet, Nizhny Novgorod, Russian Federation, <sup>2</sup>Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Abstract.** The work is devoted to the continuation of the research of the new design vessel's compact exhaust boiler. The research is carried out in order to study the influence of the operating and structural parameters of the developed exhaust boiler on its main operational indicators. The research stage described in the article includes a description of the preparation process, results and analysis of the results of the screening experiment according to the Plakett-Berman plan, conducted using a previously developed and tested numerical model of heat transfer and gas movement in the channels of a compact exhaust boiler. It explains how the analysis' data is selected from the resulting set. The results of the analysis of variance with a confidence probability of 0.95 suggest that all the selected factors are significant. The assessment of the factors' significance by the determination coefficient determines the level of relationship between each factor and the response, and the curves of the graphs of the "factor-response" dependencies qualitatively confirm the adequacy of these dependencies. The study showed that the parameters of the exhaust boiler, which can influence its operational characteristics, are chosen correctly, which allows to start preparing for an optimization experiment. The analysis of the screening experiment data confirmed the correspondence of the simulated gas-dynamic and thermal processes to the physical processes occurring in the exhaust boiler. It turned out that of all the selected factors, the operating parameter (change in the coolant velocity) has the greatest influence on the pressure drop in the exhaust boiler, and the geometric parameter (change in the length of the heat exchange section) has the greatest influence on the output temperature of the coolant.

**Key words:** compact exhaust boiler, heat exchange section, numerical modeling of thermal and gas dynamic processes, screening experiment.

**For citation:** Denis I. Bevza, Oleg P. Shurayev, Influence of structural and operating parameters on thermal and gas dynamic characteristics of the vessel's compact exhaust boiler, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 88—96.

## Введение

Наиболее распространены на отечественном флоте и наиболее часто встречаются в технической литературе [1, 2, 3, 4] котлы-utiлизаторы (КУ) таких серий как КУП, КАУ, КУВ, Ла-Монт, UNEX G и др.

Однако общеизвестность данных аппаратов не позволяет говорить об их исключительных эксплуатационных качествах и оптимальных массогабаритных показателях, подходящих для широкого внедрения в состав строящегося и модернизируемого флота. Причиной тому служит ряд недостатков, среди которых выделяются следующие основные:

- громоздкость конструкции и значительная масса, осложняющие монтаж оборудования на судне или исключающие возможность монтажа;
- сниженные показатели надежности оборудования из-за высокого числа сварных, неразъемных соединений, наличия потенциально лишних обслуживаемых элементов, подверженности теплообменных элементов термическим напряжениям в условиях неравномерности омывания теплоносителем теплообменной поверхности.

Вышеперечисленные недостатки дополняют:

- трудоемкость изготовления теплообменных элементов – для КУ змеевикового типа;
- более высокая вероятность выхода аппарата из строя – для КУ газотрубной группы.

Итогом анализа недостатков известных КУ, а также анализа конструктивных особенностей и технических потребностей строящегося флота (суда «Валдай 45Р» проекта 23180, обстановочные суда проекта 3052, гидографические, водолазные катера проектов 23040, суда проекта RSD44 типа «Капитан Рузманкин» и т.д.) стала разработка конструкции горизонтального компактного КУ секционного типа (рис.1), и, как следствие, разработка его геометрической и расчетных моделей. Процесс и результаты создания одной из численных моделей нового КУ подробно изложены в нескольких работах [5, 6, 7].

Новый, компактный КУ обладает улучшенными массогабаритными показателями по сравнению с существующими аналогами. Наглядно это демонстрируют показатели удельной массы<sup>1</sup>  $m'$  ( $\text{кг}/\text{kBt}$ ) и компактности<sup>2</sup>  $k'$  ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ), численные значения которых для предлагаемого КУ и известных аналогов – КУВ, КАУ, а также КУВИв [8, 9] – указаны в таблице 1.

Достичь вышеуказанных показателей для компактного КУ удалось благодаря интеграции в едином корпусе основных частей теплоutiлизационной установки: теплообменной, байпасной и регулирующей. Байпасный (обводной) канал в теплоutiлизационных установках с КУ серии КУВИв и с КУ типа КУВ по данным источников [1, 8, 9] увеличивает массу и размеры всей установки в 1.5 - 2 (а то и больше) раза, а с ними и число обслуживаемых элементов, требующих регулярного обслуживания или замены.

По показателям ремонтопригодности новый КУ превосходит свои аналоги, в том числе, благодаря рациональной замене в его конструкции неразъемных соединений разъемными, что обеспечивает доступ к основным элементам аппарата для проведения их обслуживания, ремонта или замены.

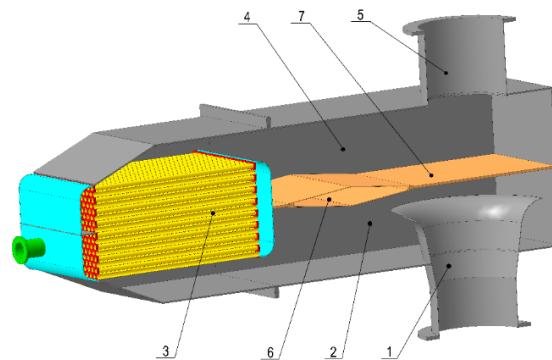


Рис. 1. Компактный котел-utiлизатор секционного типа:

1 – входной патрубок; 2 – проточная область подвода греющего теплоносителя; 3 – теплообменная секция; 4 – проточная область отвода греющего теплоносителя; 5 – выходной патрубок; 6 – заслонка; 7 – перегородка

Таблица 1  
Показатели удельной массы и компактности для компактного котла-utiлизатора и его аналогов

Название	Удельная масса $m'$ , $\text{кг}/\text{kBt}$	Коэффициент компактности $k'$ , $\text{m}^2/\text{m}^3$
Компактный КУ	2	19,6
КУВ-100	12,1	2,3
КАУ-4,5	9,3	6,4

Особого внимания заслуживает трубный пучок, выполненный съемной теплообменной секцией. Возможность установки теплообменной секции различных размеров, компоновки, с различными способами интенсификации теплообмена, с трубными элементами различных размеров и формы придала техническим характеристикам нового КУ некую гибкость, вариабельность. В зависимости от технического задания и предпочтений заказчика предоставлена возможность выбора теплообменной секции с тем или иным сочетанием таких характеристик, как теплопроизводительность и газодинамическое сопротивление.

В отличие от основной массы известных теплоutiлизационных аппаратов новый КУ спроектирован под горизонтальное размещение, например, под подволоком машинного отделения судна. Однако не исключаются варианты вертикального и наклонного размещения компактного КУ.

Интеграция основных элементов теплоutiлизационной установки в единый корпус и выбор горизонтального способа размещения аппарата косвенно заложили в конструкцию нового

<sup>1</sup>  $\text{кг}/\text{kBt}$  – масса аппарата к его тепловой мощности;

<sup>2</sup>  $\text{m}^2/\text{m}^3$  – площадь теплообменной поверхности аппарата к объему пространства, занимаемому им.

КУ ряд технических решений, влияние которых на характер движения потока во внутренних полостях КУ и теплообмен в теплообменной секции требовало изучения. По этой причине были созданы в CAD среде – геометрическая модель нового КУ – и в CFD среде – численная модель теплообмена и движения теплоносителя в его каналах.

Проведенное численное исследование предоставило информацию о характере температурного, скоростного полей и поля давления во внутренних полостях КУ. Результаты анализа полученных параметрических полей:

- подтвердили адекватность разработанной численной модели качественно достоверным решением задачи моделирования, не противоречащим законам гидродинамики и теплопередачи;

- сформировали представление об особенностях газодинамических и тепловых процессов в каналах компактного КУ, что позволило убедиться в работоспособности новой конструкции КУ и отметить удачные технические решения и проблемные области в элементах конструкции, требующие доработки;

- позволили провести качественную оценку модели ранее разработанного теплового расчета подобных КУ.

### Задачи

Положительный опыт в создании и апробации численной модели нового КУ в компьютерных средах открыл возможность дальнейшего исследования компактного КУ численными методами, заменив более ресурсозатратные натурные испытания с множеством модификаций опытных образцов однократным контрольным натурным экспериментом.

Предварительное численное исследование движения газа в каналах компактного КУ, из всего многообразия полученных результатов, главным образом, помогло подготовить основу для проведения серии численных экспериментов.

Задачами следующего этапа являлись подготовка и осуществление отсеивающего эксперимента – для исследования влияния конструкционных и эксплуатационных факторов на основные параметры КУ как теплообменного аппарата: теплопроизводительность, косвенно оцениваемую по температуре на выходе из теплообменной секции, и газодинамическое сопротивление.

### Материалы и методы

Моделирование тепловых и газодинамических процессов в новом КУ выполнялось в пакете вычислительной гидродинамики Flow Vision, реализующем конечно-объемный метод расчета, – удобном, простом и хорошо оснащенном математически. Подготовка вычислительного эксперимента включала ряд основных этапов:

- 1) Разрабатывалась математическая модель теплового расчета компактного КУ [10] и проводился предварительный тепловой расчет КУ. Анализ результатов позволил ограничиться всего одной расчетной (газовой) областью по причине неизменности температуры на наружной теплообменной поверхности;

- 2) Разрабатывалась геометрическая трехмерная модель нового КУ, из которой формировалась твердотельная модель газового пространства, определяющая границы расчетной области;

- 3) Выбиралась соответствующая система дифференциальных уравнений: движения несжимаемой жидкости, переноса энергии, турбулентности;

- 4) Задавались условия однозначности:

- рабочая среда – газ с теплофизическими свойствами воздуха;
- во всем пространстве КУ, за исключением оговоренных граничных областей, принимались начальная температура 60 °С и начальная скорость равной нулю;

- 5) Задавались граничные условия (рис. 2):

- на входе – скорость 10 м/с, температура 600 °С;
- на выходе – нулевое противодавление;
- на поверхности теплообмена – температура 61 °С, полученная в ходе предварительного теплового расчета КУ; поверхность шероховатая (логарифмическое распределение скорости в пограничном слое);

- прочие поверхности – адиабатные, шероховатые;

- 6) Задавалась расчетная сетка в виде прямоугольных параллелепипедов в количестве 40x40x60 элементов с локальным измельчением на один уровень на поверхности трубок теплообменной секции.

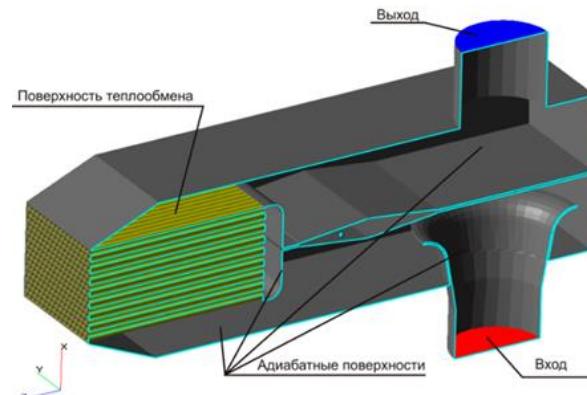


Рис. 2. Схема задания граничных условий

Программный комплекс Flow Vision позволяет помимо построения полей скорости, температуры, давления получить графики изменения множества параметров вдоль прямой линии или окружности. Поскольку ожидаемым направлением градиента температуры и давления является направление против оси x, то для проведения количественного анализа результатов моделирования через твердотельную модель пробивался в указанном направлении комплекс прямых линий.

При проведении предварительного исследования числовые значения искомых параметров снимались с девяти вертикальных контрольных линий, равномерно распределенных в области теплообменной секции компактного КУ (рис. 3).

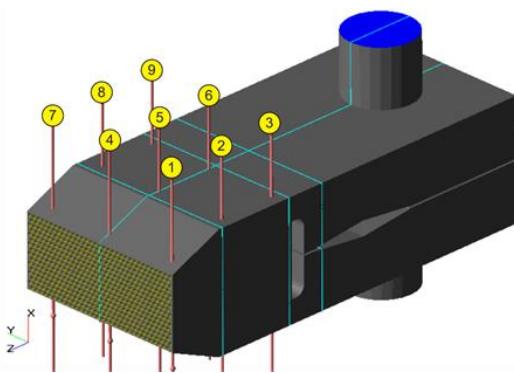


Рис. 3. Вертикальные контрольные линии в теплообменной области твердотельной модели котла-утилизатора

В процессе анализа полученных данных выяснилось, что для дальнейшего исследования нет необходимости в использовании всех контрольных линий. По плотному расположению температурных кривых на графике рисунка 4, построенных по значениям параметра для каждой линии, допустимо сделать вывод об однородности температурного поля (а значит и поля скорости, и поля давления) в теплообменной секции КУ. По этой причине, с учетом центрального расположения в теплообменной области и с учетом характера и расположения кривой на графике рисунка 4, дальнейший анализ данных выполнялся для контрольной линии 5.

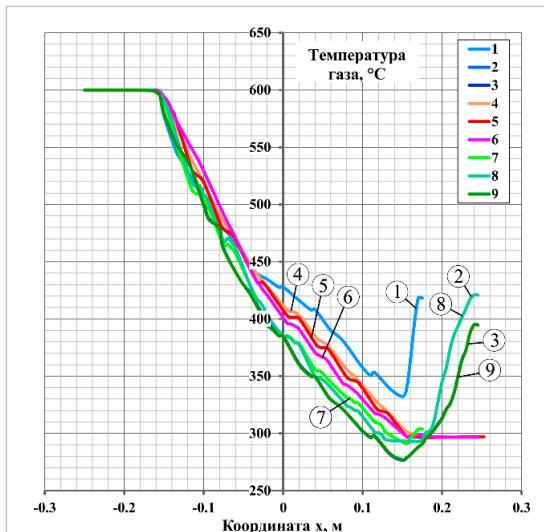


Рис.4. Изменение температуры по вертикальным контрольным линиям

При планировании отсеивающего эксперимента использовалась методика Плакетта-Бермана [11, 12, 13, 14], сокращающая количество опытов до числа переменных плюс один –  $k+1$ .

Процесс планирования включал ряд последовательных операций:

- 1) Назначались интересующие отклики объекта исследования;
- 2) Задавался ряд факторов и определялись уровни их варьирования;
- 3) Назначались основные уровни и производилось кодирование заданных факторов;
- 4) Составлялись матрицы плана эксперимента в кодированном и численном видах.

В качестве откликов (реакций) объекта исследования, характеризующих газодинамическую и тепловую эффективность компактного КУ, были выбраны следующие показатели:

–  $\Delta p$  – величина потери полного давления в компактном КУ, Па;

–  $T_n$  – температура горячего теплоносителя в контрольных точках на линии 5 (рис. 3) по направлению движения теплоносителя.

Выбор факторов  $k$ , оказывающих, по объективным соображениям, наибольшее влияние на отклики объекта исследования, был следующим:

– начальная скорость  $V_h$  в сечении входного патрубка КУ, м/с;

– количество рядов  $Z$  в пучке теплообменной секции;

– длина пучка  $L$  теплообменной секции, м.

Определялись значения факторов, варьирующихся на двух уровнях – максимальном и минимальном:

–  $V_h = 10 \div 15$ , м/с – учитывая квадратичную зависимость потерь полного давления от скорости [15, 16] и рекомендации в [16, 17] по соблюдению разумных значений потерь полного давления;

–  $Z = 12 \div 16$ ;  $L = 0,6 \div 1,2$ , м – учитывая данные по условиям обтекания теплообменной секции (ухудшаются с уменьшением  $Z$  и увеличением  $L$ ), полученные в результате предварительного численного исследования, подобрав крайние значения диапазонов числа рядов и длины теплообменного пучка, обеспечивающие баланс между достаточной теплопроизводительностью КУ и потерями полного давления в теплообменной секции (снижаются при уменьшении  $Z$  и увеличении  $L$ ).

Назначались основные уровни и производилось кодирование заданных факторов:

–  $x^0 = (V_h; Z; L) = (12,5; 14; 0,9)$  – вектор основных (нулевых) уровней факторов;

– кодирование факторов до значений +1/ -1 по уравнению:

$$X_j = \frac{x_j - x_j^0}{\Delta x_j},$$

где  $x_j$  – уровень  $j$ -го фактора;

$x_j^0$  – нулевой уровень  $j$ -го фактора;

$\Delta x_j$  – интервал варьирования  $j$ -го фактора.

В табличной форме составлялась матрица плана эксперимента сначала в кодированном виде, а после матрица конвертировалась в численный вид. Матрица плана эксперимента в обоих видах представлена в таблице 2:

Таблица 2

Матрица плана эксперимента в кодированном/численном виде

Фактор Опыт	V <sub>h</sub> (м/с)		Z		L (м)	
	код.	числ.	код.	числ.	код.	числ.
1	1	15	1	16	-1	0,6
2	-1	10	1	16	1	1,2
3	1	15	-1	12	1	1,2
4	-1	10	-1	12	-1	0,6

Именно такой вид матрицы плана отсеивающего эксперимента был выбран из-за меньших затрат времени на проведение серии численных опытов по сравнению с возможными вариантами. Анализ результатов серии предварительных численных экспериментов выявил возможность выполнения за

один сеанс нескольких вариантов расчета с одинаковой геометрией, но разными граничными условиями [7]. После периода стабилизации параметрических полей и фиксации результатов предварительного расчета был выполнен еще один расчет (из обозначенной в таблице 2 серии), продолжившийся без подготовки расчетного задания лишь с корректировкой входной скорости. Адекватность полученного решения позволила включить и засчитать этот опыт в вышеприведенный план (под номером «1»).

## Результаты и обсуждение

Результатами отсеивающего эксперимента стали данные по перепадам давления во всем КУ Др и в его теплообменной секции Дрс и данные по значениям температуры  $T_1, T_2, \dots, T_7$  в семи точках, распределенных с примерно равным шагом на вертикальной контрольной линии 5 (рис. 5) по направлению от входа в теплообменную секцию КУ к выходу из нее. Шаги для опытов с  $Z=12$  и  $Z=16$  численно разняются, но эквивалентны друг другу в пропорциональной зависимости от высоты теплообменной секции.

Указанные данные для каждого опыта из серии представлены в таблице 3.

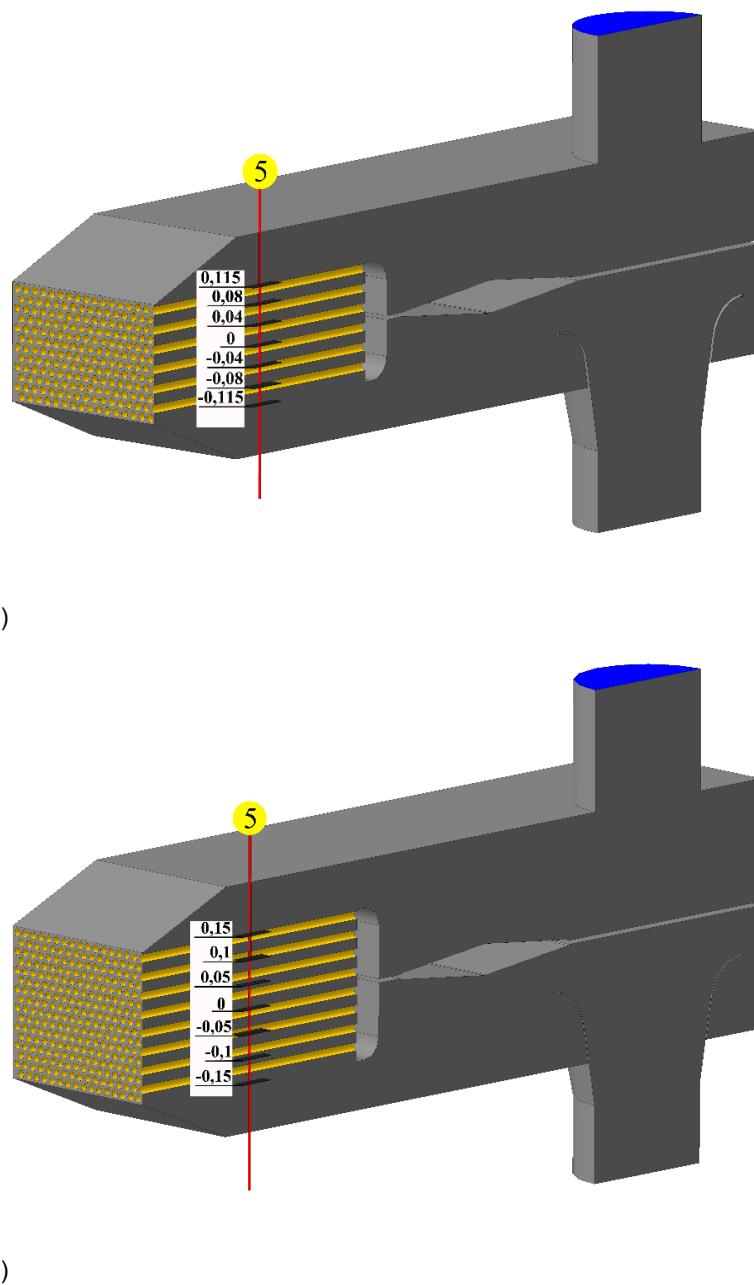


Рис. 5. Расположение точек съема температуры на вертикальной контрольной линии 5 для теплообменной секции с числом рядов (котел-утилизатор показан рассеченным, размеры указаны в метрах):  
а)  $Z=12$ ; б)  $Z=16$

Таблица 3  
Результаты отсеивающего эксперимента

№ опыта	$V_h$	Z	L	$\Delta p$	$\Delta p_c$	Temperatura в контрольных точках, °C						
						T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>
1	15	16	0,6	576	328	587	523	470	427	401	372	326
2	10	16	1,2	176	51	574	467	389	328	294	261	219
3	15	12	1,2	362	67	592	493	427	385	353	318	290
4	10	12	0,6	215	97	596	523	470	432	399	364	338

Для определения значимости выбранных факторов проводился дисперсионный анализ. Результаты анализа при доверительной вероятности 0,95 изложены в таблице 4.

Таблица 4

Итоги дисперсионного анализа результатов отсеивающего эксперимента

Отклик Фактор	$\Delta p$	$\Delta p_c$	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>
$V_h$	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Z	+	+	+	+	+	+	+	+	+
L	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Итоги дисперсионного анализа результатов отсеивающего эксперимента позволили убедиться в значимости всех выбранных факторов. Т.е., все три фактора оказывают в той или иной степени влияние на интересующие отклики.

Для визуальной оценки влияния изменения каждого фактора на изменения откликов построены кривые, показанные на графиках рисунка 6.

Для представленных графиков в программе Excel определен коэффициент детерминации  $R^2$ , по которому можно оценить степень влияния каждого из факторов на интересующий отклик.

Увеличение скорости теплоносителя  $V_h$  вызывает рост как перепадов давления во всем КУ  $\Delta p$  и в теплообменной секции  $\Delta p_c$ , так и температуры теплоносителя  $T_7$  на выходе из теплообменной секции.

Заметное увеличение перепада давления объясняется известной из гидродинамики квадратичной зависимостью потерь полного давления от скорости [15, 16]. Причем, судя по значениям  $R^2$  из графиков ( $R^2=0,76$  и  $R^2=0,3$ ), увеличение скорости в 1,5 раза наибольшим образом оказывается на газодинамическом сопротивлении всего аппарата, нежели чем на сопротивлении, создаваемом только теплообменной секцией. Что указывает на первоочередную необходимость доработки элементов именно проточной части КУ. Пусть на теплообменную секцию и приходится значительная доля потерь давления в аппарате, возможность изменения ее конфигурации, как правило, ограничена тепловым расчетом.

Значение  $R^2=0,1$  на кривой «температура-скорость» графика 7, в и характер этой кривой свидетельствуют о некотором, незначительном возрастании температуры  $T_7$  на выходе из теплообменной секции при возрастании скорости

теплоносителя  $V_h$ . Подобный эффект вызван опережающим ростом объемного расхода газа по отношению к росту теплового потока (подробнее в [7]).

Зависимость изменения числа рядов Z в КУ по отношению к перепадам давления  $\Delta p$  и  $\Delta p_c$  является прямопропорциональной, а по отношению к температуре  $T_7$  – обратнопропорциональной. И то, и другое объяснимо законами гидродинамики и теплопередачи – с увеличением числа рядов увеличивается сопротивление в теплообменной секции [15] и увеличивается площадь теплообменной поверхности, а значит и передаваемый тепловой поток [18]. Соответственно, растут перепады давления  $\Delta p$  и  $\Delta p_c$ , а температура теплоносителя  $T_7$  снижается. Причем полуторакратное увеличение Z сопровождается умеренным изменением параметров  $\Delta p_c$  и  $T_7$  ( $R^2=0,23$  и  $R^2=0,2$  соответственно).

Ниспадающий характер присущ для кривых графиков зависимостей рассматриваемых откликов от длины теплообменной секции L. Это, опять же, не противоречит законам гидродинамики и теплопередачи, т.к. удлинение теплообменной секции сопровождается увеличением как проходного сечения ее межтрубного пространства, так и увеличением теплообменной поверхности. Двукратное изменение L влечет за собой ощутимое изменение и перепада давления  $\Delta p_c$  ( $R^2=0,47$ ), и температуры  $T_7$  ( $R^2=0,7$ ).

Незначительность роста  $\Delta p$  всего аппарата ( $R^2=0,08$ ) при увеличении Z и умеренность снижения этого параметра ( $R^2=0,16$ ) при увеличении L логично объясняются нивелированием влияния изменения Z и L в теплообменной секции по отношению ко всему КУ.

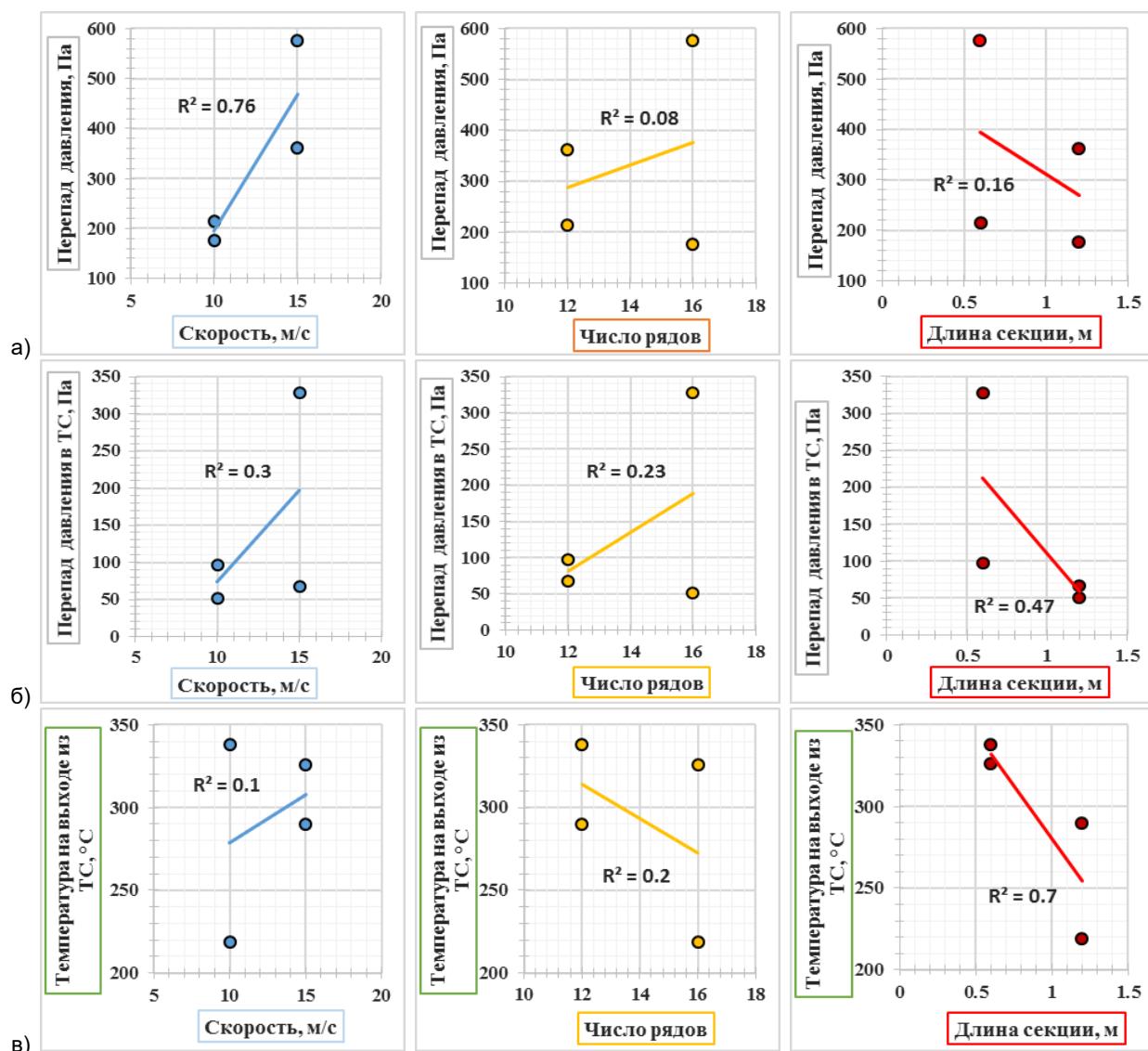


Рис. 6. Кривые зависимостей от выбранных факторов полученных откликов:

а) давления во всем котле-utiлизаторе; б) давления в теплообменной секции; в) температуры греющего теплоносителя на выходе из теплообменной секции

#### Заключение

Оценивая по значениям коэффициента детерминации  $R^2$  влияние на каждый отклик всех выбранных факторов можно сделать следующие выводы. Из трех выбранных факторов наибольшее влияние:

- на перепад давления во всем аппарате  $\Delta p$  оказывает полугорячкное изменение скорости  $V_n$  ( $R^2=0,76$ ), т.е. режимный параметр;
- на перепад давления в теплообменной секции  $\Delta p_c$  оказывает двукратное изменение ее длины ( $R^2=0,47$ ). Хотя это влияние немногим больше влияния полугорячкного изменения скорости  $V_n$  ( $R^2=0,3$ ) и полугорячкного изменения числа рядов  $Z$  ( $R^2=0,23$ );
- на температуру теплоносителя  $T_7$  на выходе теплообменной секции оказывает двукратное изменение ее длины ( $R^2=0,7$ ), т.е. геометрический параметр.

В результате проведенного отсеивающего эксперимента по плану Плакетта-Бермана, состоящему из четырех опытов, с использованием апробированной ранее численной модели тепловых и газодинамических процессов в компактном КУ, установлено, что факторы, способные оказать наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики аппарата, выбраны верно. Все они являются значимыми с доверительной вероятностью 0,95. Кроме того, по графикам зависимостей «фактор-отклик» и коэффициентам детерминации, полученным по данным эксперимента, была оценена степень значимости каждого фактора для каждого интересующего отклика. Качественный анализ графиков показал соответствие газодинамических и тепловых полей протекающим в КУ физическим процессам.

Итоги отсеивающего эксперимента планируется использовать как основу при подготовке оптимизационного эксперимента на следующем этапе исследований.

## Литература

- 1 Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы: учебное пособие; 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1988. 296 с.
- 2 Енин В.И., Денисенко Н.И., Костылев И.И. Судовые котельные установки: учебное пособие. М.: Транспорт, 1993. 216 с.
- 3 Лысенко В.К., Лубочкин Б.И. Судовые паровые котлы. Устройство и эксплуатация: учебное пособие; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1975. 320 с.
- 4 Корнилов Э.В., Афанашченко В.Н., Бойко П.В. Вспомогательные и утилизационные котлы морских судов: учебное пособие. Одесса: Феникс, 2004. 167 с.
- 5 Шураев О.П., Бевза Д.И., Валиулин С.Н. Исследование полей скорости и температуры в каналах котла-utiлизатора методом численного моделирования // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2016. № 3. С. 49 - 56.
- 6 Шураев О.П., Бевза Д.И., Валиулин С.Н. Результаты численного моделирования движения газа в каналах компактного котла-utiлизатора // Вестн. Волж. гос. акад. водного транспорта. 2017. № 50. С. 268-276.
- 7 Шураев О.П., Бевза Д.И., Валиулин С.Н. Сравнительный анализ влияния скорости газа на температурное поле и гидродинамические потери в теплообменной секции компактного котла-utiлизатора // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2017. № 2. С. 77-85, doi: 10.24143/2073-1574-2017-2-77-85
- 8 Бевза Д.И. Анализ конструкций судовых утилизационных котлов // Вестник Волжской Государственной Академии Водного Транспорта. 2012. №32. С. 199–202.
- 9 Валиулин С.Н., Пискулин В.Г., Шабаров В.В. Проектирование водотрубного котла-utiлизатора на базе численного моделирования тепловых и гидрогазодинамических процессов // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2014. № 1. С. 48–54.
- 10 Бевза Д.И. Расчет и проектирование судового водотрубного котла-utiлизатора компактной конструкции // Труды 19-го международного научно-промышленного форума "Великие реки-2018". 2018. Выпуск 7. Секция VI. С. 1–4.
- 11 Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.
- 12 Зуйков Д.В., Крупин А.Е. Отсеивание факторов при планировании эксперимента // Вестник НГИЭИ. 2014. №4 (35). С. 62–70.
- 13 Сидоров А.И., Абдуллоев Р.Т. Разработка плана отсеивающего эксперимента по исследованию влияния различных факторов на процесс коррозии заземляющих устройств // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Энергетика. 2016. №2. С. 52–58, doi: 10.14529/power160207
- 14 Кондратьев В.А., Егорова С.А. О выборе факторов и описании свойств модели при инженерном синтезе технических устройств и систем // Гео-Сибирь. Новосибирск, 2005. №7. С. 121–126.
- 15 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям; под ред. М.О Штейнберга; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
- 16 Байгалиев Б.Е., Щелчков А.В., Яковлев А.Б., Гортышов П.Ю. Теплообменные аппараты: учебное пособие; под ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Изд-во Казанского государственного технического университета, 2012. 180 с.
- 17 Зах Р.Г. Котельные установки: учебное пособие. М.: Энергия, 1968. 352 с.
- 18 Селиверстов В.М., Бажан П.И. Термодинамика, теплопередача и теплообменные аппараты. М.: Транспорт, 1988. 288 с.

## References

- 1 Hryapchenkov A.S. Sudovye vspomogatel'nye i utilizacionnye kotly [Vessel's auxiliary and exhaust boilers]: uchebnoe posobie; 2-e izd., pererab. i dop. L.: Sudostroenie, 1988. 296 s.
- 2 Enin V.I., Denisenko N.I., Kostylev I.I. Sudovye kotel'nye ustavokvi [Vessel's boiler installations]: uchebnoe posobie. M.: Transport, 1993. 216 s.
- 3 Lysenko V.K., Lubochkin B.I. Sudovye parovye kotly. Ustrojstvo i ekspluataciya [Vessel's steam boilers. Arrangement and maintenance]: uchebnoe posobie; 3-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1975. 320 s.
- 4 Kornilov E.V., Afanashchenko V.N., Bojko P.V. Vspomogatel'nye i utilizacionnye kotly morskikh sudov [Auxiliary and exhaust boilers of marine vessels]: uchebnoe posobie. Odessa: Feniks, 2004. 167 s.
- 5 Shurayev O.P., Bevza D.I., Valiulin S.N. Issledovanie polej skorosti i temperatury v kanalah kotla-utilizatora metodom chislennogo modelirovaniya [The research of the speed and temperature fields in the exhaust boiler's gas channels by the numerical experiment method]. Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2016. № 3. S. 49-56.
- 6 Shurayev O.P., Bevza D.I., Valiulin S.N. Rezul'taty chislennogo modelirovaniya dvizheniya gaza v kanalah kompaktnogo kotla-utilizatora [The numerical modeling results of gas dynamics in the ducts of the compact exhaust boiler]. Vestn. Volzh. gos. akad. vodnogo transporta. 2017. № 50. S. 268-276.
- 7 Shurayev O.P., Bevza D.I., Valiulin S.N. Sravnitel'nyj analiz vliyanija skorosti gaza na temperaturnoe pole i gidrodinamicheskie poteri v teploobmennoj sekci kompaktnogo kotla-utilizatora [The comparative analysis of the gas speed's influence to the temperature field and hydrodynamic losses in the exchanger section of the compact exhaust boiler]. Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2017. № 2. S. 77–85, doi: 10.24143/2073-1574-2017-2-77-85
- 8 Bevza D.I. Analiz konstrukcij sudovyh utilizacionnyh kotlov [The construction analysis of the vessel's exhaust boilers]. Vestnik Volzhskoj Gosudarstvennoj Akademii Vodnogo Transporta. 2012. №32. S. 199–202.

- 9 Valiulin S.N., Piskulin V.G., Shabarov V.V. Proektirovaniye vodotrubnogo kotla-utilizatora na baze chislennogo modelirovaniya teplovih i hidrogazodinamicheskikh processov [Designing of the water-tube recovery boiler based on numerical modeling of heat and hydro-gasdynamic processes]. Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2014. № 1. S. 48–54.
- 10 Bevza D.I. Raschet i proektirovaniye sudovogo vodotrubnogo kotla-utilizatora kompaktnoj konstrukcii [The calculation and design of the marine water-tube compact exhaust boiler]. Trudy 19-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma "Velikie reki-2018". 2018. Vypusk 7. Sekciya VI. S. 1–4.
- 11 Novik F.S., Arsov YA.B. Optimizaciya processov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov [Optimization of metal technology processes by the methods of experiment planning]. M.: Mashinostroenie; Sofiya: Tekhnika, 1980. 304 s.
- 12 Zujkov D.V., Krupin A.E. Otseivanie faktorov pri planirovaniyi eksperimenta [Screening out the factors during experiment planning]. Vestnik NGIEI. 2014. №4 (35). S. 62–70.
- 13 Sidorov A.I., Abdulloev R.T. Razrabotka plana otseivayushchego eksperimenta po issledovaniyu vliyaniya razlichnyh faktorov na process korrozii zazemlyayushchih ustrojstv [Development of plan for screening experiment aimed to examine influence of various factors on corrosion of grounding devices]. Vestnik YUUrGU. Ser.: Energetika. 2016. №2. S. 52–58, doi: 10.14529/power160207
- 14 Kondrat'ev V.A., Egorova S.A. O vybore faktorov i opisanii svojstv modeli pri inzhenernom sinteze tekhnicheskikh ustrojstv i system [About factors' selection and model's properties description during the technical devices and systems engineering fusion]. Geo-Sibir'. Novosibirsk, 2005. №7. S. 121–126.
- 15 Ide'lchik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Hydraulic resistances guide]; pod red. M.O Shtejnberga; 3-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1992. 672 s.
- 16 Bajgaliev B.E., Shchelchkov A.V., Yakovlev A.B., Gortyshov P.YU. Teploobmennye apparaty [Heat exchangers]: uchebnoe posobie; pod red. YU.F. Gortyshova. Kazan': Izd-vo Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2012. 180 s.
- 17 Zah R.G. Kotel'nye ustanovki [Boiler installations]: uchebnoe posobie. M.: Energiya, 1968. 352 s.
- 18 Seliverstov V.M., Bazhan P.I. Termodynamika, teploperedacha i teploobmennye apparaty [Thermodynamics, heat transfer and heat exchangers]. M.: Transport, 1988. 288 s.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Денис Игоревич Бевза**, инженер-специалист ГЦКБ Речфлота, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Малая Ямская, д. 18, корп. 1, e-mail: bvz.denis@yandex.ru

**Denis I. Bevza**, specialist engineer of Gorky central design bureau of the river fleet, Malaya Yamskaya, 18/1, Nizhnij Novgorod, Russian Federation, e-mail: bvz.denis@yandex.ru

**Олег Петрович Шураев**, кандидат технических наук, доцент кафедры Эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: solwrk@inbox.ru

**Oleg P. Shurayev**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Vessel's power plants exploitation, Volga state university of water transport, Nesterova, 5, Nizhnij Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: solwrk@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 22.12.2021.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.03.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2022.

**Научная статья**

УДК 629.12:621.184.72

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.013>

## **Влияние типа используемого теплоизоляционного материала на состояние кирпичной кладки судовых котлов**

**В.А. Туркин<sup>1</sup>** [turvla@mail.ru](mailto:turvla@mail.ru), **А.А. Стяжкин<sup>1</sup>** [sasha-lol12@mail.ru](mailto:sasha-lol12@mail.ru)

<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** Показано, что при деформации картона МКРКЛ-450 уплотнение крепежного болта становится негерметично, и воздух, находящийся в воздуховоде котла, поступает сначала за кладку, а затем по стержню в топочное пространство. При этом происходит охлаждение кирпича в районе отверстия и болта, что создает высокие температурные напряжения. Возникает циклическая механическая нагрузка в местах крепления болта к кирпичу за счёт поочерёдного увеличения или уменьшения длины. При протечке воздуха через щель в топку интенсивно циклически охлаждаются кромки кирпича, что также способствует развитию усталостных разрушений. Одновременно происходит разрушение картона и ослабление болтов, которые перестают удерживать кирпичи, подвергая их совместному действию механических и температурных напряжений. Это приводит к возникновению усталостных трещин, разрушению мертвеля и самих кирпичей. Установленные в ходе исследования неудовлетворительные механические свойства картона МКРКЛ-450 приводят к первоначальному прорыву воздуха под кирпичную кладку, нештатному прожатию картона с остаточной деформацией, нарушению структуры картона, его разрушению и «выдуванию», последующему ослаблению посадки кирпича, появлению дополнительных степеней свободы его креплению, перегреву кирпичей и мертвеля, его выкрашиванию, выпадению кирпичей, попаданию воздушно-газовой смеси в соседние участки и цепной реакции разрушения кладки.

**Ключевые слова:** судовые котлы, теплоизоляционный материал, картон, кирпичная кладка, разрушение

**Для цитирования:** Туркин В.А., Стяжкин А.А. Влияние типа используемого теплоизоляционного материала на состояние кирпичной кладки судовых котлов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 97—103.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.013>

## **Influence of the type of the heat-insulating material used on the state of the bricking of ship boilers**

**Vladimir A. Turkin<sup>1</sup>** [turvla@mail.ru](mailto:turvla@mail.ru), **Alexander A. Styazhkin<sup>1</sup>** [sasha-lol12@mail.ru](mailto:sasha-lol12@mail.ru)

<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Krasnodar region, Russian Federation

**Abstract.** It is shown that when the cardboard MKRKL-450 is deformed, the seal of the fixing bolt becomes leaky, and the air in the boiler air duct enters first behind the masonry, and then through the rod into the furnace space. In this case, the brick is cooled in the region of the hole and the bolt, which creates high temperature stresses. There is a cyclic mechanical load in the places where the bolt is attached to the brick due to the successive increase or decrease in length. When air leaks through the slot into the furnace, the edges of the brick are intensively cyclically cooled, which also contributes to the development of fatigue failures. At the same time, the destruction of the cardboard and the weakening of the bolts occur, which cease to hold the bricks, exposing them to the combined action of mechanical and thermal stresses. This leads to the occurrence of fatigue cracks, the destruction of the mortar and the bricks themselves. The unsatisfactory mechanical properties of MKRKL-450 cardboard, established during the study, lead to an initial breakthrough of air under the brickwork, abnormal compression of the cardboard with residual deformation, violation of the structure of the cardboard, its destruction and “blowing”, the subsequent weakening of the brick fit, the appearance of additional degrees of freedom of it fastening, overheating of bricks and mortar, its chipping, falling out of bricks, ingress of an air-gas mixture into neighboring areas and a chain reaction of masonry destruction.

**Keywords:** ship boilers, thermal insulation material, cardboard, brickwork, destruction

**For citation:** Vladimir A. Turkin, Alexander A. Styazhkin, Influence of the type of the heat-insulating material used on the state of the bricking of ship boilers, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 97—103.

### **Введение**

Работа судового парового котла сопровождается значительным тепловыделением, действующим не только на поверхности нагрева, но и на другие конструктивные элементы парового котла. Для защиты металлических элементов внутреннего кожуха от воздействия высокой температуры все

конструкции, не закрытые поверхностями нагрева, покрывают слоем тепловой изоляции.

В качестве изоляции в паровых котлах используют асбест, шамотный кирпич, огнеупорные керамические изделия, огнеупорные карбид-кремниевые изделия, совелитовые плиты [1].

Кирпичная кладка (футеровка) покрывает все стены топки и газоходов вплоть до района, где температура газов не превышает 600 °С. Кирпичи

крепятся к внутреннему кожуху через слой асбестокартона. Он выдерживает необходимую температуру и имеет достаточную плотность, а также защищает кирпичную кладку котла от повреждений и препятствует возникновению пожароопасной ситуации.

Проблема с использования асбокартона связана с патогенными свойствами асбеста, а также распространением продуктов, содержащих этот материал.

Каждый год около 100 000 человек во всем мире умирают от болезней, вызванных асбестом, таких как рак легких и рак бронхов, мезотелиома плевры или брюшины, в том числе 15 000 человек умирают только в Европе [2, 3].

Люди, подвергшиеся воздействию асбеста, чаще болеют раком поджелудочной железы, желудка, почек и так далее, причем последствия для здоровья от патогенного воздействия асбеста часто проявляются через много лет после попадания волокон в организм человека, например рак вызванные асбестом – даже после 60 лет [4].

Асbestовые волокна нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, а высокий потенциал применения асбеста был обусловлен его хорошими прочностными и теплоизоляционными свойствами, хорошей стойкостью к химическим и биологическим агентам, в том числе морской воде, а также его конкурентоспособной ценой [5].

Асбест использовался не только в производстве асбестоцементного изоляционного листа, но и огнеупорной одежды и тканей, изоляции труб и котлов и так далее [6].

Из-за высококанцерогенных свойств асбеста производство асбестосодержащих продуктов было радикально сокращено во всем мире и полностью или частично прекращено почти в 70 странах [7].

Одним из методов решения экологических проблем, вызванных эксплуатацией судовых технических средств, могут быть инструменты нейромоделирования, которые позволяют реализовать новые подходы к прогнозированию динамики происходящих в теплоизоляционных материалах нестационарных теплообменных процессах [8, 9].

### **Свойства исследуемых материалов**

В данном исследовании оценивалась возможность замены асбестоцементного изоляционного листа – картона марки МКРКЛ-450 на не содержащие асбест материалы – картон огнеупорный стекловолокнистый марки МКРКЛ-450.

Картон марки МКРКЛ-450. ТУ1593-003-05902307-98. Плотность картона МКРКЛ-450 – 450 кг/м<sup>3</sup>. Теплопроводность материалов в области рабочих температур: 0,1 ... 0,12 Вт/(м·К).

Асбокартон марки КАОН-1. ГОСТ 2850-95. Плотность картона КАОН-1 – 1000 ... 1400 кг/м<sup>3</sup>. Теплопроводность материалов в области рабочих температур: 0,15 ... 0,16 Вт/(м·К).

### **Испытания картонов на прочность**

Важнейшей характеристикой картонов является их прочность на сжатие.

Исследования проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 17177-94 «Материалы и

изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний». Метод определения прочности на сжатие при 10%-ной линейной деформации распространяется на неорганические волокнистые и органические ячеистые теплоизоляционные изделия.

Сущность метода заключается в измерении значения сжимающих усилий, вызывающих деформацию образца по толщине на 10 % при соответствующих условиях испытания.

Средства испытания: машина испытательная, обеспечивающая скорость нагружения образца 5 – 10 мм/мин и позволяющая измерить нагрузку с погрешностью, не превышающей 1 % значения сжимающего усилия; индикатор часового типа; линейка металлическая; штангенциркуль.

Из изделия выпиливают образец в форме параллелепипеда длиной и шириной  $(100 \pm 1)$  мм и толщиной, равной толщине изделия. Предел допускаемой погрешности измерения длины и ширины образца линейкой  $\pm 0,5$  мм, штангенциркулем  $\pm 0,1$  мм.

Для проведения испытания образец помещают в машину таким образом, чтобы сжимающее усилие действовало по вертикальной оси образца, и измеряют нагрузку, при которой он уплотняется (деформируется) на 10 %. Измерение деформации образца производят индикатором часового типа. Отчет деформации образцов начинают при удельной нагрузке на образец  $(2000 \pm 100)$  Па (кроме образцов органических ячеистых изделий).

Прочность на сжатие при 10 %-ной линейной деформации  $\sigma_{10}$  в МПа вычисляется по формуле:

$$\sigma_{10} = P/(l \cdot b), \quad (1)$$

где  $P$  – нагрузка при 10 %-ной линейной деформации, Н;  $l$  – длина образца, мм;  $b$  – ширина образца, мм).

Сущность метода определения предела прочности при сжатии заключается в измерении значения сжимающих усилий, вызывающих разрушение образца при соответствующих условиях испытания.

Средствами контроля являлись: штангенциркуль и машина испытательная, обеспечивающая скорость нагружения образца 5 – 10 мм/мин и позволяющая измерить значение нагрузки с погрешностью, не превышающей 1 % значения разрушающего усилия.

При подготовке к испытанию из изделия выпиливался образец в форме куба с размером ребра  $(100 \pm 1)$  мм. Длину и ширину верхнего и нижнего основания образца измеряли штангенциркулем по двум параллельным ребрам. Предел допускаемой погрешности измерения  $\pm 0,1$  мм. Длиной и шириной образца считалось среднее арифметическое значение четырех измерений длины и ширины верхнего и нижнего оснований.

В процессе проведения испытания целый или составной по высоте образец устанавливался в машину так, чтобы сжимающее усилие было направлено по вертикальной оси образца. Разрушающей считалась наибольшая нагрузка, отмеченная при испытании образца в момент его разрушения.

Предел прочности при сжатии  $R$  в МПа вычислялся по формуле:

$$R = P/(l \cdot b), \quad (2)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, Н;  $l$  – длина образца, мм;  $b$  – ширина образца, мм.

Для проведения испытаний с целью определения прочности на сжатие при 10%-ной линейной деформации вырезались из картона (толщина 10 мм) квадраты 50x50мм 5 шт.

С каждым образцом выполнялись следующие действия:

1. Замерить толщину картона в четырёх точках (по центру каждого ребра).

2. Уложить квадрат строго по центру нижней плиты испытательной машины.

3. Закрепить на верхней плите индикатор перемещения.

4. Вручную поджать образец картоны верхней плитой при помощи винтовой передачи. Показания индикатора выставить на «0».

5. Включить насос машины при открытом байпасе. Контрольную стрелку нагрузки перевести в нулевое положение.

6. Прикрывая байпас на машине медленно поднимать усилие сжатия. После достижения деформации в 10% (1мм) сбросить нагрузку.

7. В ручную винтовым приводом поднять верхнюю плиту.

8. Замерить толщину картона в четырёх точках (по центру каждого ребра).

9. Уложить квадрат строго по центру нижней плиты испытательной машины.

10. Закрепить на верхней плите индикатор перемещения.

11. Вручную поджать образец картоны верхней плитой при помощи винтовой передачи. Показания индикатора выставить на «0».

12. Включить насос машины при открытом байпасе. Контрольную стрелку нагрузки перевести в нулевое положение.

13. Прикрывая байпас на машине медленно поднимать усилие сжатия до 20Т. Замерить деформацию, сбросить нагрузку.

14. Вручную винтовым приводом поднять верхнюю плиту.

15. Замерить толщину картона в четырёх точках (по центру каждого ребра).

16. Осмотреть образец, проверить его на целостность.

Для проведения испытаний с целью определения предела прочности при сжатии вырезались из картона (толщина 10 мм) квадраты 50x50 мм 25 шт.

С каждым образцом выполнялись следующие действия:

1. Замерить толщину пяти образцов картона в четырёх точках (по центру каждого ребра).

2. Уложить в стопку по пять образцов строго друг на друга.

3. Замерить общую высоту стопки.

4. Уложить стопку строго по центру нижней плиты испытательной машины.

5. Закрепить на верхней плите индикатор перемещения.

6. В ручную поджать стопку образцов картона верхней плитой при помощи винтовой передачи. Показания индикатора выставить на «0».

7. Включить насос машины при открытом байпасе. Контрольную стрелку нагрузки перевести в нулевое положение.

8. Прикрывая байпас на машине медленно (п. 13.4) поднимать усилие сжатия. После разрушения стопки картона отметить максимальную нагрузку и сбросить нагрузку.

9. Отметить величину деформации при разрушении.

10. В ручную винтовым приводом поднять верхнюю плиту.

11. Осмотреть образец, проверить его на целостность.

Все предписанные ГОСТ 17177-94 процедуры для исследования с применением опытного метода были выполнены в изложенной выше последовательности. Исследование механических свойств картонов проводились на прессе статическом универсальном ПСУ-100.

Результаты исследований для картона КАОН-1 представлены в таблицах 1 и 2.

Результаты исследований для картона МКРКЛ-450, представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 1

№ опыта	Толщина образца до испытаний, мм					$P$ , Н	$\sigma_{10}$ , МПа	Толщина образца после испытаний, мм					Прим.
	1	2	3	4	Ср.			1	2	3	4	Ср.	
1	9,8	10	9,4	9,9	9,78	5880	2,352	9,7	9,6	9,7	9,8	9,70	*
2	10,2	10,2	10,2	10	10,15	6370	2,548	9,7	9,8	9,7	9,8	9,75	*
3	10,1	10,2	10,1	10	10,10	6272	2,509	9,8	9,6	9,7	9,6	9,68	*
4	10	10,2	10	10	10,05	610	2,391	9,7	9,8	9,7	9,8	9,75	*
5	10	9,8	10,1	10	9,98	5978	2,352	9,8	9,6	9,7	9,7	9,70	*
Средн.					10,01	6076	2,43						9,72

Продолжение таблицы 1

№ опыта	$P$ , Н	$\sigma$ , МПа	Толщина образца после испытаний, мм					Прим.
			1	2	3	4	Ср.	
1	196000	78,4	7,4	7,3	7,4	7,3	7,35	**
2	196000	78,4	7,2	7,3	7,2	7,3	7,25	**
3	196000	78,4	7,3	7,3	7,4	7,3	7,33	**
4	196000	78,4	7,4	7,3	7,4	7,3	7,35	**
5	196000	78,4	7,4	7,3	7,4	7,3	7,35	**
Средн.	196000	78,4					7,33	

ПРИМЕЧАНИЯ: \*) – большая часть остаточной деформации пришлась на деформацию треугольного рифления на одной из сторон картона КАОН-1. Средняя остаточная деформация 0,29мм;

\*\*) – картон уплотнился, поверхности стали гладкими и твёрдыми.

Таблица 2

№ опыта	Толщина образца, мм					$P$ , Н	$R$ , кгс/см <sup>2</sup>	Деформация, мм	Прим.
	1	2	3	4	Cр.				
1	50,2	50,5	50,3	50,2	50,30	196000	78,4	15	*
2	50,1	50,0	50,2	50,1	50,10	196000	78,4	15	*
3	50,2	50,3	50,2	50,2	50,23	196000	78,4	14,5	*
4	50,3	50,5	50,5	50,4	50,43	196000	78,4	15	*
5	50,2	50,4	50,3	50,2	50,28	196000	78,4	14,5	*
Средн.					50,27	196000	78,4	14,8	

ПРИМЕЧАНИЕ: \*) - картон уплотнился, поверхности контакта с плитами стали гладкими и твёрдыми, пластины плотно склеились друг с другом. Разрушение структуры картона при максимальной нагрузки пресса (196000 Н) не обнаружено.

Таблица 3

Прочность на сжатие при 10%-ной линейной деформации картона МКРКЛ-450, δ=10 мм

№ опыта	Толщина образца до испытаний, мм					$P$ , Н	$\sigma_{10}$ , МПа	Толщина образца после испытаний, мм					Прим.
	1	2	3	4	Cр.			1	2	3	4	Cр.	
1	9,9	10	9,9	9,9	9,93	2940	1,176	9,3	9,3	9,2	9,3	9,28	*
2	10	10,1	10,1	10	10,05	3234	1,294	9,2	9,1	9,2	9,3	9,20	*
3	10,1	10,1	10,1	10	10,08	2940	1,176	9,1	9,0	9,1	9,1	9,08	*
4	10	10,1	10	10	10,03	3038	1,215	9,2	9,1	9,2	9,1	9,15	*
5	10	9,9	10,1	10	10,00	2940	1,176	9,2	9,2	9,1	9,2	9,18	*
Средн.					10,02	3018	1,207					9,18	

Продолжение таблицы 3

№ опыта	$P$ , Н	$\sigma$ , МПа	Толщина образца после испытаний, мм					Прим.
			1	2	3	4	Cр.	
1	196000	78,4	-	-	-	-	-	**
2	196000	78,4	-	-	-	-	-	**
3	196000	78,4	-	-	-	-	-	**
4	196000	78,4	-	-	-	-	-	**
5	196000	78,4	-	-	-	-	-	**
Средн.	196000	78,4	-	-	-	-	-	

ПРИМЕЧАНИЯ: \*) - большая часть остаточной деформации пришлась на выравнивание поверхностей сторон картона. Средняя остаточная деформация 0,84мм;

\*\*) – картон разрушился, превратился в пылевидную массу

Таблица 4

Прочность на сжатие при 10%-ной линейной деформации картона МКРКЛ-450, δ=10 мм

№ опыта	Толщина образца, мм					$P$ , Н	$R$ , МПа	Деформация при разрушении, мм	Примечание
	1	2	3	4	Средн.				
1	50,1	50,4	50,3	50,2	50,25	14210	5,684	10,30	*
2	50,2	50,3	50,2	50,2	50,23	13720	5,488	10,50	*
3	50,5	50,5	50,3	50,3	50,40	14700	5,880	11,00	*
4	50,2	50,1	50,3	50,2	50,20	14210	5,684	12,00	*
5	50,3	50,4	50,3	50,2	50,30	13720	5,488	11,60	*
Средн.					50,28	14112	5,638	11,08	

ПРИМЕЧАНИЕ: \*) - картон разрушился, превратился в несвязанные между собой волокна, находящиеся в пылевидной массе.

#### Выводы по результатам испытаний картонов на прочность

При испытании образцы асбокартона КАОН-1 ( $\delta=10\text{мм}$ ) при обжатии по одному и в стопке из пяти пластин вплоть до усилия в 196000 Н (20 т) не претерпели каких либо внешних и внутренних изменений. Они стали плотнее и твёрже, стопки из пяти пластин под максимальной нагрузкой превратились в монолитную массу с постоянством квадратного поперечного сечения.

Важной характеристикой используемых картонов являются их упругие свойства и остаточная деформация. Измерения показали, что после снятия нагрузки 10% и 196000 Н, что длина и ширина образцов изменилась не более, чем на 1%. Толщина образцов восстановилась на 97% при нагрузке в 6076 Н (причем большая часть остаточной деформации пришлась на деформацию треугольного рифления на одной из сторон картона) и на 73% при нагрузке в 196000 Н (20 т). Видимых различий внутренней структуры пластин КАОН-1 до и после помещения под пресс не обнаружено.

При испытании картона МКРКЛ-450 остаточная деформация более чем в 3 раза выше, чем картона КАОН-1 (в процентном выражении к начальной толщине). При обжатии внутренняя структура картона МКРКЛ-450 нарушается, материал расслаивается и превращается в пылевидную массу при нагрузке в 13720 Н. После снятия нагрузки материал МКРКЛ-450 полностью в исходное состояние не возвращается. Чем выше нагрузка, тем в большей степени он разрушается. При многократных повторных нагрузлениях внутренние волокнистые структуры МКРКЛ-450 выкрашиваются и выпадают из образцов в виде пылевидной массы.

По качественной сравнилительной характеристике картон КАОН-1 превосходит картона МКРКЛ-450 по прочностным параметрам в 14 раз. Картон КАОН-1 сохраняет свою структуру при этих нагрузках, что говорит о его высокой уплотняющей способности. Тогда как картон МКРКЛ-450 при нагрузках более чем на порядок ниже уже превращается в пылевидную массу.

#### Определение пластических уплотняющих свойств

Пластины обоих картонов размером 160x250 просверлены новым (в состоянии поставки) сверлом Ø12,5 мм из стали Р18 и затем зажимались между стальными пластинами 160x160 и стягивались болтом с усилием, формируемым при затяжке болта М12 стандартным рожковым ключом от руки.

Результат опыта для картона МКРКЛ-450 S=10,0 мм представлен на рисунках 1 и 2.

Отверстия в МКРКЛ-450 ровные, без заусенец. Диаметр отверстий ≈13 мм. После обжатия усилием 50 кН пластин из картона МКРКЛ-450 установлено, что диаметр отверстий в МКРКЛ-450 после обжатия практически не изменился.

Опыт с обжатием просверленной пластины показывает, что при использовании картона МКРКЛ-450 из-за отсутствия уплотняющего эффекта функция герметизации болтовых соединений была потеряна. В результате этого возникает возможность попадания воздуха через болтовое соединение и изменение посадки кирпича при проявлении остаточной деформации картона МКРКЛ-450, схематично показанное на рисунке 3.

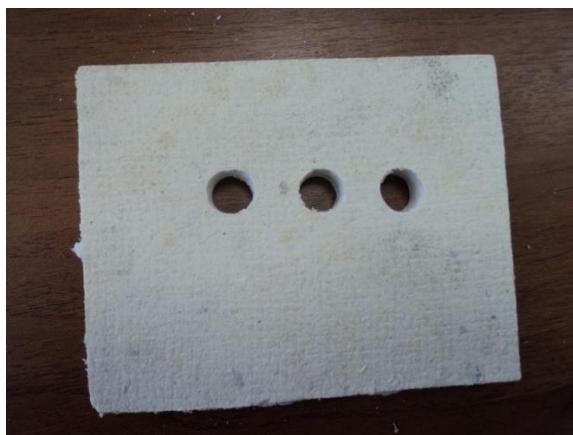


Рис. 1. Вид просверленных отверстий сверлом Ø12,5 в картоне МКРКЛ-450



Рис. 2. Вид картона МКРКЛ-450 и отверстий после обжатия

В результате наклона болта появляются две контактные точки, где сосредотачиваются усилия от веса кирпича и различных динамических воздействий. Появляются две зоны локальных повышенных напряжений, которые могут привести к скалыванию кирпича в зоне внутреннего отверстия или растрескиванию кирпича в целом.

Результат опыта для асбокартона КАОН-1 S=5,0 мм представлены на рисунках 4 и 5. Отверстия в КАОН-1 неровные с образованными по краям валиками из распущенного асбеста, причем с обеих сторон пластины. Диаметр отверстий ≈ 11...12 мм.

После обжатия усилием 50 кН пластин КАОН-1 получено (рис.5), что валики на отверстиях КАОН-1 завальцевались до поверхности пластины и диаметр отверстий уменьшился до 9-10 мм. Распущенные во время сверления края отверстий уплотнились. Опыт с обжатием просверленной пластины показывает, что при использовании картона КАОН-1 вследствие наличия уплотняющего эффекта функция герметизации болтовых соединений не была потеряна.

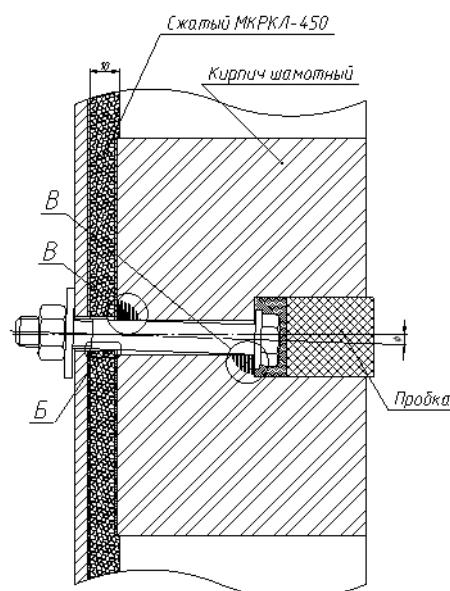


Рис. 3. Посадка кирпича на МКРКЛ-450 δ=10,0мм с деформацией картона: Б – неуплотненный зазор в металлической стенке. В – участки локального напряжения



Рис. 4. Вид просверленных отверстий сверлом Ø12,5 в картоне КАОН-1 с рифленой стороны



Рис. 5. Вид просверленных отверстий сверлом в картоне КАОН-1 после обжатия

В результате этого возможность попадания воздуха через болтовое соединение не возникает и не происходит изменение посадки кирпича.

Асбестосодержащий картон марки КАОН-1 при приложении к нему внешней силы ведет себя как упругий материал. Кроме упругих свойств, картон марки КАОН-1 обладает свойством уплотнять узлы болтовых креплений кирпичей обмуровки к кожуху котла.

Картон огнеупорный стекловолокнистый марки МКРКЛ-450 при приложении к нему внешней силы необратимо деформируется. Внутренние слои картона под нагрузкой растрескиваются, после

снятия нагрузки внутренние слои картона распадаются на отдельные чешуйки. Он не обнаруживает уплотняющих свойств, более того он интенсивно разрушается при повышенном давлении в воздуховоде котла и, тем самым, еще более ухудшает свое уплотняющее действие.

### Заключение

Исследование возможности замены содержащего асбест картона марки МКРКЛ-450 на не содержащие асбест картон огнеупорный стекловолокнистый марки МКРКЛ-450 показало следующее.

При деформации картона МКРКЛ-450 уплотнение крепежного болта кирпича становится негерметично, и воздух, находящийся в воздуховоде котла, поступает сначала за кладку, а затем по стержню в топочное пространство. При этом происходит охлаждение кирпича в районе отверстия и болта. Значительный расход «холодного» воздуха через узкую щель между болтом и кирпичом позволяет интенсивно охлаждать кромки кирпича в зоне высоких температур, создавая тем самым высокие температурные напряжения. Возникает циклическая механическая нагрузка в местах крепления болта к кирпичу за счёт поочерёдного увеличения или уменьшения длины.

Помимо этого, при протечке воздуха через щель в топку интенсивно циклически охлаждаются кромки кирпича, что также способствует развитию усталостных разрушений. Одновременно будет происходить разрушение картона (МКРКЛ-450) и практически полное ослабление болтов, которые перестанут удерживать кирпичи, подвергая их совместному действию механических и температурных напряжений, что приведет к возникновению усталостных трещин, разрушению мертвеля и самих кирпичей.

Установленные в ходе исследования неудовлетворительные механические свойства картона МКРКЛ-450 будут приводить к первоначальному прорыву воздуха под кирпичную кладку, нештатному прожатию картона с остаточной деформацией, нарушению структуры картона, его разрушению и «выдуванию», последующему ослаблению посадки кирпича, появлению дополнительных степеней свободы его крепления, перегреву кирпичей и мертвеля, его выкрашиванию, выпадению кирпичей, попаданию воздушно-газовой смеси в соседние участки и цепной реакции разрушения кирпичной кладки.

### Литература

- Денисенко Н.И., Костылев И.И. Судовые котельные установки. СПб.: «Элмор», 2005. 288 с.
- Iwaszko J., Lubas M., Sitarz M., Zajemska M., Nowak A. 2021. Production of vitrified material from hazardous asbestos-cement waste and CRT glass cullet. Journal of Cleaner Production. 15 July 2021 Volume 317 (Cover date: 1 October 2021) Article 128345.
- Koszewar A. 2016. Usuwanie wyrobów zawierających azbest. [https://www.wfisgw.zgora.pl/sites/default/files/media/azbest2016/azbest\\_20-06-2016.pdf](https://www.wfisgw.zgora.pl/sites/default/files/media/azbest2016/azbest_20-06-2016.pdf). (дата обращения 07.02.2022 г.).
- Witek J., Psiuk B., Nasiemiec Z., Kusiorowski R. 2019. Obtaining an artificial aggregate from cement-asbestos waste by the melting technique in an arc-resistance furnace. Fibers 7 (2). <https://doi.org/10.3390/fib7020010>. (дата обращения 07.02.2022 г.).
- Paglietti F., Malinconico S., Conestabile della Staffa B., Bellagamba S., De Simone P. 2016. Classification and management of asbestos-containing waste: European legislation and the Italian experience. Waste Manag 50, 130-150. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.014>. (дата обращения 07.02.2022 г.).
- Park S.-H. 2018. Types and health hazards of fibrous materials used as asbestos substitutes. Saf. Health Work. 9, 360–364. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2018.05.001>. (дата обращения 07.02.2022 г.).

7. Ramos-Bonilla J.P., Cely-García M.F., Giraldo M. 2019. An asbestos contaminated town in the vicinity of an asbestos-cement facility: the case study of Sibat'e, Colombia. Environ. Res. 176 https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.031. (дата обращения 07.02.2022 г.).
8. Епихин А. И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Прогнозирование многомерных нестационарных временных рядов с использованием нейромоделирования. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-4(50). С. 23-27. DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.092.
9. Brezean O., Epikhin A. 2022 Increase efficiency of a gas compressing facility in Oil and Gas Industry. Setting up an efficient design review session during a construction project. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 968 012006.

#### References

1. Denisenko N.I., Kostylev I.I. Sudovye kotel'nye ustanovki [Marine boiler plants]. SPb.: «Elmor», 2005. 288 s.
2. Iwaszko J., Lubas M., Sitarz M., Zajemska M., Nowak A. 2021. Production of vitrified material from hazardous asbestos-cement waste and CRT glass cullet. Journal of Cleaner Production. 15 July 2021 Volume 317 (Cover date: 1 October 2021) Article 128345.
3. Koszewar A. 2016. Usuwanie wyrobów zawierających azbest. [https://www.wfosigw.zgora.pl/sites/default/files/media/azbest2016/azbest\\_20-06-2016.pdf](https://www.wfosigw.zgora.pl/sites/default/files/media/azbest2016/azbest_20-06-2016.pdf). (data obrashcheniya 07.02.2022 г.).
4. Witek J., Psiuk B., Naziemiec Z., Kusiorowski R. 2019. Obtaining an artificial aggregate from cement-asbestos waste by the melting technique in an arc-resistance furnace. Fibers 7 (2). <https://doi.org/10.3390/fib7020010>. (data obrashcheniya 07.02.2022 г.).
5. Paglietti F., Malinconico S., Conestabile della Staffa B., Bellagamba S., De Simone P. 2016. Classification and management of asbestos-containing waste: European legislation and the Italian experience. Waste Manag 50, 130-150. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.014>. (data obrashcheniya 07.02.2022 г.).
6. Park S.-H. 2018. Types and health hazards of fibrous materials used as asbestos substitutes. Saf. Health Work. 9, 360–364. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2018.05.001>. (data obrashcheniya 07.02.2022 г.).
7. Ramos-Bonilla J.P., Cely-García M.F., Giraldo M. 2019. An asbestos contaminated town in the vicinity of an asbestos-cement facility: the case study of Sibat'e, Colombia. Environ. Res. 176 https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.031. (data obrashcheniya 07.02.2022 г.).
8. Epikhin A.I., Kondrat'ev S.I., Khekert E.V. Prognozirovaniye mnogomernykh nestatsionarnykh vremennykh ryadov s ispol'zovaniem neyromodelirovaniya [Prediction of multivariate non-stationary time series using neuromodeling] Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-4(50). С. 23-27. – DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.092.
9. Brezean O., Epikhin A. 2022 Increase efficiency of a gas compressing facility in Oil and Gas Industry. Setting up an efficient design review session during a construction project. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 968 012006.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Владимир Антонович Туркин**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: turvla@mail.ru

**Александр Алексеевич Стяжкин**, аспирант кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: sasha-lol12@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

**Vladimir A. Turkin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Operation of ship mechanical installations, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: turvla@mail.ru

**Alexander A. Styazhkin**, Graduate student of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: sasha-lol12@mail.ru

**Научная статья**

УДК 621.431.74

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.014>

## Анализ отказов крейцкопфных подшипников судовых дизелей

А.К. Полковников<sup>1</sup> polkov5@mail.ru, Н.А. Полковникова<sup>1</sup> natalia-polkovnikova@mail.ru,

<sup>1</sup> Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** С повышением степени форсировки судовых малооборотных дизелей (МОД), ростом максимального давления сгорания проблема обеспечения надёжности подшипников и в первую очередь крейцкопфных остаётся актуальной. Рассмотрены конструктивные особенности крейцкопфных подшипников, предложены критерии оценки несущей способности и ударной нагруженности. В работе выполнен статистический анализ отказов, их причин и условий эксплуатации подшипников. При эксплуатации МОД наиболее эффективные меры, направленные на повышение работоспособности подшипников, связаны с выбором оптимальных режимов работы двигателя с целью ограничения действующей нагрузки и повышения запаса несущей способности подшипников. С износом и увеличением зазора в подшипнике несущая способность масляного клина снижается и возникает опасность появления полусухого трения и прогрессирующего износа. Усталостная прочность и долговечность подшипника определяется температурой антифрикционного слоя нижней (опорной) части вкладыша, для измерения которой была разработана система контроля температуры. Для непрерывного контроля технического состояния подшипников МОД высокую эффективность показала система контроля износов подшипников (Bearing Wear Monitoring System), которая измеряет комбинированный физический износ рамовых мотылёвых и крейцкопфных подшипников, обеспечивая раннее предупреждение об увеличении скорости износа вкладышей.

**Ключевые слова:** малооборотный дизель, шатун, крейцкопфный подшипник, вкладыш, антифрикционный слой, масляный клин, суммарная движущая сила, износ, фrettинг коррозия, система контроля износа подшипников

**Для цитирования:** Полковников А.К., Полковникова Н.А. Анализ отказов крейцкопфных подшипников судовых дизелей, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 104—111.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.014>

## Failure's analysis of marine diesel engines crosshead bearings

Anatoly K. Polkovnikov<sup>1</sup> polkov5@mail.ru, Natalia A. Polkovnikova<sup>1</sup> natalia-polkovnikova@mail.ru

<sup>1</sup> Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** With an increase of forcing degree of marine low-speed diesel engines (MOD), an increase in maximum combustion pressure, the problem of ensuring reliability of bearings, and primarily crosshead bearings, remains relevant. The design features of crosshead bearings are considered, criteria for assessing the bearing capacity and shock loading are proposed. The paper considers a statistical analysis of failures, their causes and operating conditions of bearings has been carried out. The design features of crosshead bearings are considered, criteria for assessing the bearing capacity and shock loading are proposed. During the operation of the low-speed diesel engine, the most effective measures aimed at improving the performance of bearings are associated with the choice of optimal operating modes of the engine in order to limit the current load and increase the bearing capacity margin. With wear and an increase in bearing clearance the load-bearing capacity of the oil wedge decreases and there is a risk of semi-dry friction and progressive wear. The fatigue strength and durability of the bearing is determined by the temperature of antifriction layer of the lower (support) liner's part, for the measurement of which a temperature control system was developed. For continuous monitoring of bearings technical condition, the Bearing Wear Monitoring System has shown high efficiency, which measures the combined physical wear of frame crank and crosshead bearings, providing early warning of an increase in the wear rate of liners.

**Keywords:** low-speed diesel engine, connecting rod, crosshead bearing, shell, antifriction layer, oil wedge, total driving force, deterioration, fretting corrosion, bearing wear monitoring system

**For citation:** Anatoly K. Polkovnikov, Natalia A. Polkovnikova, Failure's analysis of marine diesel engines crosshead bearings, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 104—111.

### Введение

С повышением степени форсировки и снижением частоты вращения в малооборотных судовых дизелях (МОД) нового поколения с высокой степенью наддува, ростом максимального давления сгорания проблема обеспечения надёжности подшипников и в первую очередь крейцкопфных остаётся актуальной. Это подтверждается, в частности, статистическим анализом отказов главных двигателей (ГД) серий

RTA, RT-flex (Wartsila) и SMC-C, SME-C (MAN) судов танкерного флота.

Анализ условий эксплуатации крейцкопфных подшипников показал, что их работа характеризуется комплексом сложных процессов, воздействие на которые в эксплуатации ограничено. При эксплуатации МОД нового поколения наиболее эффективные меры, направленные на повышение работоспособности подшипников, связаны с выбором оптимальных режимов работы двигателя с

целью ограничения действующей нагрузки и повышения запаса несущей способности подшипника.

Механическая напряжённость в процессе эксплуатации не поддаётся непосредственному контролю и может быть определена теоретически из анализа соотношения действующих на подшипник сил. В качестве критерия механической напряжённости крейцкопфных подшипников обычно рассматривается максимальная суммарная движущая сила:

$$P_{\Sigma}^{\max} = P_{\max} - P_j = P_{\max} - \mu \cdot m_n \cdot R \cdot (1 + \lambda) \cdot \omega^2 \quad (1)$$

где  $P_{\max}$  – сила от максимального давления сгорания,  $P_j$  – сила инерции поступательно движущихся масс,  $\mu$  – коэффициент, учитывающий несовпадение моментов действия  $P_{\max}$  и  $P_j$  (10...15 град. поворота коленчатого вала). Расчётные графики зависимостей суммарной движущей силы и силы давления газов от угла поворота коленчатого вала представлены на рис. 1.

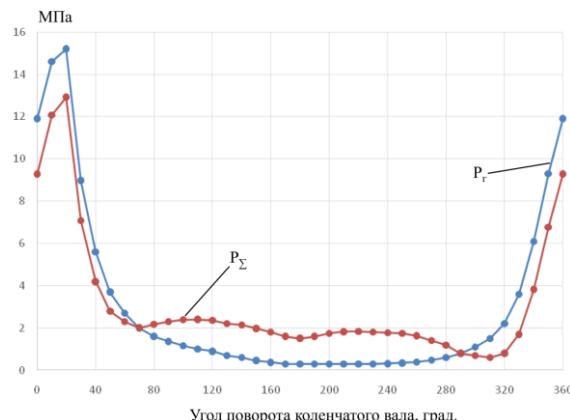


Рис. 1 – Расчётные графики зависимостей суммарной движущей силы  $P_{\Sigma}$  и силы давления газов  $P_r$  от угла поворота коленчатого вала

Удельное давление на крейцкопфный подшипник в МОД серии SME-C (MAN) составляет:

- максимальное  $P_{kp}^{\max} = P_{\Sigma}^{\max} = 14,7$  МПа;
- среднее  $P_{kp}^{cp} = 4,96$  МПа

Давление, отнесённое к единице площади крейцкопфного подшипника:

- максимальное

$$K_{kp}^{\max} = P_{kp}^{\max} \cdot (F_p/f_{kp}) = 14,7 \cdot (0,407/0,229) = 26,1 \text{ МПа}; \quad (2)$$

где  $F_p$  и  $f_{kp}$ , м<sup>2</sup> – площади поршня и опорной поверхности крейцкопфного подшипника;

- среднее

$$K_{kp}^{cp} = P_{kp}^{cp} \cdot (F_p/f_{kp}) = 4,96 (0,407/0,229) = 8,81 \text{ МПа}, \quad (3)$$

что допустимо, так как  $K_{kp}^{\max} \leq 30$  МПа и

$K_{kp}^{cp} \leq 10$  МПа.

Отношение максимального давления к среднему

$$K_{kp}^{\max}/K_{kp}^{cp} = 26,1/8,81 = 2,96, \quad (4)$$

что допустимо, так как  $K_{kp}^{\max}/K_{kp}^{cp} \leq 3,5$ .

Таким образом по прочности и степени ударности нагрузок ( $K^{\max}/K^{cp}$ ) крейцкопфные подшипники удовлетворяют установленным нормам.

В крейцкопфном двигателе верхняя головка шатуна соединена с цапфой поперечины крейцкопфа

(крейцкопфный подшипник), а нижняя головка соединена с мотылёвой шейкой коленчатого вала (мотылёвый подшипник). Нижняя часть верхней головки шатуна подвергается сжатию движущей силой, а стержень – сжатию и продольному изгибу.

К конструкции шатунов предъявляют следующие основные требования: высокая жёсткость и прочность головок шатуна и его стержня при возможно меньшей массе (для уменьшения сил инерции); высокая усталостная прочность, податливость (упругость) и равнозначная прочность шатунных болтов (шпилек). При увеличении жёсткости подшипника улучшаются условия образования масляного клина (подшипник сохраняет цилиндрическую форму), равномернее распределяются удельные давления по поверхности антифрикционного слоя и уменьшается нагрузка шатунных шпилек. В большинстве случаев повреждения шатунов происходят под действием внешних сил, которые могут согнуть стержень шатуна. Наибольший изгибающий момент действует в сечении шатуна, расположенном ближе к нижней головке. На рис. 2 показано фото шатуна с изгибом стержня под действием суммарной движущей силы.



Рис. 2 – Фото изгиба стержня шатуна

Значение максимальной суммарной движущей силы ( $P_{\Sigma}^{\max}$ ) существенно зависит от режима работы двигателя. При работе МОД по винтовой характеристике максимальная движущая сила со снижением частоты вращения в диапазоне (1...0,9)· $n_h$  увеличивается. Это связано с тем, что на режимах полного хода за счёт системы автоматического изменения угла опережения подачи топлива (система VIT – variable injection timing) сила от максимального давления сгорания ( $P_{\max}$ ) остаётся неизменной, а силы инерции ( $P_j$ ) уменьшаются.

Значительное повышение нагрузки на крейцкопфные подшипники происходит во время пусков – реверсов двигателя. Это объясняется тем, что во время пусков – реверсов при низкой частоте вращения величина  $P_j$  незначительна. Вследствие низкой частоты вращения в 4...5 раз возрастает время действия максимального усилия при более динамичном характере нагружения и при неблагоприятных условиях смазки подшипников, так как относительная скорость скольжения подшипника и поперечины близка к нулю [1-5].

На установленвшемся режиме (постоянство нагрузок и скорости вращения) силы давления в слое

масла находятся в равновесии с нагрузкой на цапфу, положение цапфы стабилизируется, и она вращается в отверстии подшипника с определенным постоянным эксцентрикитетом (расстояние от центра подшипника  $M_B$  до центра цапфы  $M_Z$ ), определяющим наименьшую толщину масляной пленки  $h_0$  и характеризующим минимальное расстояние между цапфой и нижним вкладышем подшипника. При изменении нагрузки на цапфу, а в дизелях нагрузка на подшипники кривошипно-шатунного механизма (КШМ) определяется непрерывно меняющимися в течение рабочего цикла силами давления газов и силами инерции поступательно движущихся и вращающихся масс, центр цапфы меняет свое положение, меняется и толщина пленки в зоне масляного клина. Цапфа то удаляется от нижнего вкладыша подшипника, то приближается к нему, выдавливая масло из зазора. Минимальная величина  $h_0$  может достигать 3...5 мкм, что составляет несколько процентов от величины зазора в подшипнике и в большинстве случаев оказывается меньше большинства находящихся в масле частиц загрязняющих примесей (пропускная способность масляных фильтров обычно 12...15 мкм). Их контакт с подшипником неизбежно влечёт за собой периодическое возникновение полусухого трения, появление рисок и износ. Эксплуатация двигателя на режимах высоких нагрузок сопряжена с ростом сил давления газов и, соответственно, ростом нагрузок на подшипники, а это провоцирует повышенные износы.

Зависимость минимальной толщины масляной пленки  $h_{0 \min}$  от величины нагрузки на вал (цапфу) определяется также скоростью вращения вала  $n$  (об/мин) и вязкостью масла. С увеличением скорости вращения и вязкости больше масла нагнетается в зону масляного клина, давление в нём и, соответственно, его несущая способность растёт, и шейка вала всплывает вверх. Поэтому в условиях эксплуатации не допускать длительной работы двигателей при низких оборотах и высоких нагрузках; не допускать разжижения масла топливом и в случае падения вязкости за допустимые пределы принимать меры к замене масла. С износом и увеличением зазора в подшипнике несущая способность масляного клина снижается,  $h_0$  уменьшается и возникает опасность появления полусухого трения и прогрессирующего износа. В противоположность отмеченному уменьшение зазора способствует росту несущей способности масляного слоя. Но здесь надо иметь в виду, что для каждого подшипника существует своя критическая величина минимально допустимого зазора, при которой в связи с уменьшением прокачиваемого через зазор масла появляется опасность сокращения количества отводимого от подшипника тепла и, как следствие - его перегрев. С повышением температуры в зоне трения вязкость масла в зазоре снижается, а это влечет за собой ещё большее снижение несущей способности масляного клина. Пределы уменьшения зазора диктуются также опасностью местных перегревов из-за касания трущихся поверхностей вследствие возможной несоосности положения цапфы в подшипнике, приобретения ею в процессе износа овальности и эллиптичности.

Рост нагрузок на подшипники, вызванный форсировкой двигателей наддувом, требование

повышения их эксплуатационной надежности, в частности, увеличения усталостной прочности антифрикционного слоя, вызвали необходимость перехода к подшипникам с тонкостенными трехслойными вкладышами. Как известно, антифрикционные металлы должны обладать высокими усталостными характеристиками, хорошей прирабатываемостью, способностью удерживать масло на поверхности, вбирать в себя мелкие механические включения, противостоять задирям и пр. В новых трехкомпонентных подшипниках перечисленные свойства отдельных подшипниковых сплавов объединены в единую конструкцию, состоящую из стальной тонкостенной основы, обеспечивающей прочность и жёсткость вкладыша, покрытым слоем антифрикционного сплава AlSn40 с содержанием олова 40%. Оловянисто-алюминиевый сплав AlSn40 представляет собой композицию из алюминия (Al) и олова (Sn), в которой олово внедрено в трехмерную решётку из алюминия. Антифрикционные качества этой композиции весьма близки к оловянистым баббитам, но несущая способность этого материала гораздо выше, это объясняется сочетанием олова и алюминия, в котором олово обеспечивает хорошую абсорбцию примесей, а также антифрикционные качества, а алюминиевая решётка действует, как эффективный поглотитель нагрузки. К конструкции крейцкопфного подшипника предъявляют следующие требования: высокая жёсткость; обеспечение условий создания масляного «клина»; хороший теплоотвод от вкладышей; минимальные перепады давлений в потоке масла через подшипник (для предотвращения кавитационных разрушений рабочего слоя); антифрикционный сплав должен выдерживать большие ударные нагрузки и давления (максимальное давление на подшипник от действия газовых и инерционных сил в МОД достигает 14...16 МПа); малый коэффициент трения; высокая усталостная прочность и коррозионно-кавитационная износостойкость; способность поглощать твёрдые частицы и хорошо прирабатываться.

Поверхность скольжения подшипников выполняется с центрально расположенной маслоподводящей канавкой и другими конструктивными особенностями, такими как: касательные профили (выходы), масляные клиньи (скосы) и/или разгрузочные расточки. Масляные канавки и клиньи выполняют следующие функции: 1) улучшение распределения масла по несущим поверхностям подшипника (скошенные кромки улучшают условия входа масла); 2) содействие образованию гидродинамической масляной пленки (клина) между несущими нагрузку поверхностями; 3) обеспечение масляного охлаждения (масляные канавки). Чтобы выполнять эти функции, масло должно свободно протекать от масляных канавок, по масляным клиньем (скосам) к опорным поверхностям, где масляная пленка несет нагрузку. Хорошее маслоснабжение должно обеспечивать отвод тепла от омываемой поверхности либо через масляный зазор между шейкой и подшипником, либо через осевые канавки на поверхности скольжения подшипника.

Уменьшение толщины вкладыша в нагруженной зоне крейцкопфных подшипников за данный период времени представляет собой скорость износа подшипников, которая составляет 0,01 мм/10000 часов. Для

крейцкопфных подшипников, предельная величина износа ограничивается сокращением на примерно 50% длины масляного клина. Необходимо также учитывать состояние поверхности шейки цапфы.

Встречающиеся в процессе эксплуатации повреждения подшипников можно условно разделить на следующие группы: 1) износ вкладышей; 2) усталостное трещинообразование и выкрашивание (растрескивание антифрикционного слоя нижних вкладышей); 3) коррозия (отслаивание замкнутых зон); 4) натирь, натяг металла и налипание его на поверхность поперечины, риски и царапины; 5) эрозия и кавитация; 6) фреттинг коррозия и питтинг; 7) подплавление и выплавление антифрикционного слоя; 8) полное разрушение.

Обычно при инспекции картера МОД находят стружку и куски антифрикционного слоя (рис. 3).

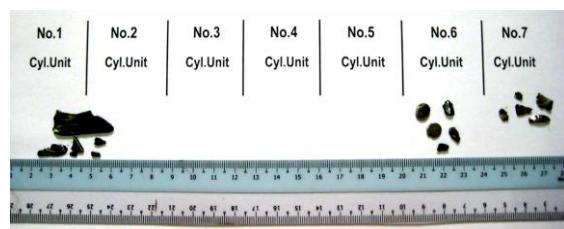


Рис. 3 – Выкрашивания антифрикционного слоя вкладышей крейцкопфных подшипников найдены в картере (по цилиндром)

После вскрытия подшипников обнаружаются дефекты. На рис. 4 представлены фото с характерными дефектами вкладышей крейцкопфных подшипников.



а)



б)



в)



г)

Рис. 4 – Фото вкладышей крейцкопфного подшипника с характерными дефектами:  
а) и б) отслаивание и выкрашивание антифрикционного слоя соответственно, в) прогар вкладыша,  
г) задир цапфы поперечины

В основном изнашиваются нижние вкладыши крейцкопфных подшипников, верхние вкладыши мотылевых и нижние вкладыши рамовых подшипников. При этом наибольший износ отмечается в наиболее нагруженных зонах, располагающихся в средней части вкладышей по их окружности, здесь в первую очередь исчезает тонкий приработочный слой оловянного покрытия и проявляются следы финишной механической обработки. Через несколько тысяч часов на наиболее

нагруженных участках может износиться оловяно-свинцовистое покрытие, толщина которого обычно составляет 0,015...0,040 мм.

Ненормальные случаи изнашивания и повреждения подшипников чаще всего вызываются действием следующих причин: 1) длительная работа двигателей на режимах высоких нагрузок и оборотов, приводящая к возможному перегреву масла, снижению его вязкости и уменьшению несущей способности масляного клина; 2) работа

подшипников в режиме граничного трения из-за недостаточного поступления масла (низкое давление в системе, загрязнение масляных каналов); 3) несоблюдение сроков смены масла, отсутствие контроля за его качественными показателями (истощение присадок, загрязнение масла продуктами окисления и частицами продуктов изнашивания); 4) разжижение масла топливом, попадание в него воды из системы охлаждения. Статистические исследования показывают причины повреждения крейцкопфных подшипников:

- 40...50 % случаев приходится на наличие в масле загрязняющих примесей, попадание в него твердых углеродистых частиц и продуктов износа;
- 20...30 % – недостаточное поступление масла и снижение его вязкости;
- 20 % соотносятся с нарушениями технологии при сборке.

Абразивное изнашивание вызывается попаданием в циркулирующее в подшипниках масло твердых грязевых частиц, под влиянием которых появляются на рабочей поверхности вкладышей риски, царапины, а иногда, и глубокие борозды; поверхность выглядит так, как это происходит при задирах из-за недостатка масла, чрезмерно высоких нагрузок и перегрева.

Расслаивание антифрикционного слоя обычно выражается в отслаивании оловянно-свинцовистого слоя от стальной основы вкладыша. Это происходит при многократных деформациях неплотно сидящих в расточке подшипника вкладышей под действием чрезмерно высоких нагрузок. Причиной может быть также появление задира, при котором вкладыш перегревается и алюминиевый слой отрывается от стальной основы. Значительно реже расслаивание возникает в результате технологических нарушений, допущенных при изготовлении подшипников.

Повреждение подшипников под действием кислотных соединений проявляется в возникновении в зонах, удаленных от действия высоких нагрузок, повышенного износа и шероховатой поверхности оловянно-свинцовистого сплава. Обводнение масла сопровождается образованием эмульсий, существенно снижает смазывающую способность. Под действием коррозии по краям области изнашивания появляются тёмные пятна с шероховатой или слегка пористой поверхностью. Затем вследствие износа пятна снимаются и появляется блестящий слой; в этом случае наблюдается повышенное изнашивание, хотя первопричиной является коррозия.

В последнее время широкое применение получают системы контроля содержания воды в масле ГД с датчиком и показывающим прибором. Такие системы позволяют своевременно обнаруживать обводнение масла и не допускать коррозионного разрушения вкладышей.

Исследования поверхностного слоя вкладышей крейцкопфных подшипников при помощи рентгеновских лучей показывают, что в слоях толщиной от 5 до 30 мкм возникают структурные изменения, обусловленные сложным напряжённым состоянием материала, в результате чего могут произойти усталостное разрушение или отслаивание от основы. При недостатке смазки резкий подъём цапфы способен вызвать явления кавитации, что обуславливает появление дополнительных

концентраторов напряжений. Кавитационные явления, неизбежно возникающие в динамически нагруженных подшипниках, приводят к таким же последствиям, как и усталость металла, поэтому их трудно разделить и достоверно указать причину разрушения.

Первые конструктивные меры борьбы с повреждениями заключались в снижении среднего удельного давления на крейцкопфный подшипник за счёт увеличения опорной площади. Последним решением этого направления является применение в дизелях серий МС (МАН) и RTA (Зульцер) полноопорного крейцкопфного подшипника. Однако эти меры оказались недостаточными (поз. 4 рис. 2).

Для разработки метода оценки технического состояния крейцкопфных подшипников была составлена структурная схема причинно-следственных связей отказов [6-10]. На первом уровне этой схемы находятся структурные составляющие подшипника, на втором – возможные неисправности и на третьем – диагностические (контролируемые) параметры. В сложных условиях трения характеризовать работоспособность крейцкопфных подшипников каким-то одним критерием, например, средним удельным давлением ( $p_{ср}$ ) или величиной  $p_{ср} \cdot V_{ск}$  ( $V_{ск}$  – скорость скольжения) невозможно. Более объективную оценку может дать комплекс нижеперечисленных показателей:

- минимальная толщина смазочного слоя;
- максимальное давление в смазочном слое;
- максимальное давление на антифрикционный слой;
- максимальная температура в смазочном слое и на поверхности скольжения или температура антифрикционного слоя;
- коэффициент нагруженности подшипника.

Эти величины могут быть определены как экспериментально, так и расчётным путем. Выбор другого, казалось бы, более информативного, диагностического параметра, для включения его в систему технического диагностирования, например, вибраакустического, нецелесообразен, так как периодический контроль технического состояния более просто осуществляется непосредственным измерением зазора щупом, а именно изменение зазора приводит к изменению вибраакустических показателей.

Для оценки технического состояния крейцкопфных подшипников в условиях эксплуатации предлагается использовать комплекс расчётно-экспериментальных показателей. Для оценки влияния режимных факторов на нагруженность крейцкопфных подшипников использован безразмерный коэффициент грузоподъёмности (нагруженности):

$$\varphi = \frac{k}{\mu \cdot \omega} \cdot \left( \frac{\Delta}{d} \right)^2 \quad (5)$$

где  $k = P/d \cdot l$  – среднее давление на единицу площади проекции подшипника,  $P$  – передаваемое усилие,  $\mu$  – динамическая вязкость масла,  $\omega$  – угловая скорость цапфы,  $d$  – диаметр цапфы,  $\Delta = D - d$  – диаметральный зазор в подшипнике,  $D$  и  $l$  – диаметр и длина подшипника.

Расчётная оценка нагруженности крейцкопфных подшипников на режимах винтовой характеристики была произведена для двигателя 6Л35МС по двум

критериям: коэффициенту грузоподъёмности  $\varphi$  и отношению  $\frac{P_{\max}^{el}}{P_{cp}}$ . Анализ показал, что в диапазоне  $(0,75...0,85) \cdot P_{\text{ен}}$  винтовой характеристики коэффициент нагруженности крейцкопфных подшипников (КП) может превышать номинальное значение на 11 %, а отношение максимального давления в масляном слое к среднему удельному – на 7,5 % при этом возрастает влияние фактора динамики. Поэтому работа ГД 6L35MC в пределах указанных режимов будет с наибольшими нагрузками на крейцкопфные подшипники. Аналогичные результаты расчётов получены для ГД 6RTA58 и 6S50MC.

Усталостная прочность и долговечность подшипника определяется температурой антифрикционного слоя, поэтому этот параметр был принят в качестве диагностического, как наиболее информативный и удобный для контроля. Для непрерывного измерения температуры антифрикционного слоя нижней (опорной) части крейцкопфного подшипника в «ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова» была разработана «Система централизованного контроля температуры крейцкопфных подшипников» (СЦКТ КП). Исследования теплового состояния антифрикционного слоя нижней опорной части крейцкопфных подшипников ГД 8RND90 производились с помощью СЦКТ КП во всём диапазоне рабочих режимов от  $40 \text{ мин}^{-1}$  до  $108 \text{ мин}^{-1}$  в условиях эксплуатационных рейсов. В период испытаний температура антифрикционного слоя в контролируемых точках приработанного подшипника изменялась в пределах  $45...56^{\circ}\text{C}$ . Как показали испытания, зависимость температуры антифрикционного слоя подшипника от режима работы двигателя незначительная. В результате проведённого эксперимента проверена возможность постоянного эксплуатационного контроля температуры крейцкопфных подшипников МОД с помощью разработанной «Системы централизованного контроля температуры» [11-13].

Принятые расчётные критерии нагруженности крейцкопфных подшипников, а также показания СЦКТ КП позволяют существенно расширить информационную базу контроля технического состояния ГД при решении задач технической эксплуатации. При эксплуатации МОД нового поколения наиболее эффективные меры, направленные на повышение работоспособности подшипников, связаны с выбором оптимальных режимов работы ГД с целью ограничения действующей нагрузки и повышения запаса несущей способности подшипника.

В настоящее время для непрерывного контроля технического состояния подшипников главных судовых двухтактных дизелей широкое применение получила «Система контроля износов подшипников» (Bearing Wear Monitoring System – KONSBERG). Система измеряет и отображает на мониторе в ЦПУ (центральный пост управления) комбинированный физический износ рамовых мотылёвых и крейцкопфных подшипников, обеспечивая раннее предупреждение об увеличении скорости износа вкладышей. Система контроля износа подшипников использует два датчика, установленных в картере каждого цилиндра. Датчики специально изготовлены,

чтобы обеспечить надёжные и точные измерения в течение многих лет работы двигателя. Измерения происходят каждый раз, когда крейцкопф проходит нижнюю мёртвую точку. Система контроля износа подшипников разработана в соответствии с указаниями компаний MAN Diesel и Германского Ллойда (Germanischer Lloyd) и является одной из систем, требуемых для исключения проверок со вскрытием. Для данного типа классификации необходимы следующие системы: 1) контроля износа подшипников (Bearing Wear Monitoring System); 2) измерения температуры подшипников (Crosshead and crank temperature monitoring – SENTRY); 3) контроля воды в масле (Water in Oil sensor); 4) устройство заземления коленчатого вала (Shaft Earthing Device); 5) компьютеризированная система планового обслуживания (Computerised Planned Maintenance System). Программное обеспечение и компоненты указанных систем являются общими с судовой системой мониторинга K-Chief 600 и системой дистанционного автоматизированного управления главным двигателем AutoChief® C20 (KONGSBERG), что позволяет интегрировать системы между собой и иметь общую поддержку.

### Заключение

- Статистический анализ повреждений крейцкопфных подшипников показал, что наиболее характерными являются следующие дефекты: 1) интенсивный износ вкладышей; 2) усталостное трещинообразование и выкрашивание (растresкивание антифрикционного слоя нижних вкладышей); 3) коррозия (отслаивание замкнутых зон); 4) натирь, натяг металла и налипание его на поверхность поперечины, риски и царапины; 5) эрозия и кавитация; 6) фреттинг коррозия и питтинг; 7) выплавление антифрикционного слоя. В работе выполнен анализ причин таких повреждений.

- Для разработки метода оценки технического состояния крейцкопфных подшипников в условиях эксплуатации предлагается использовать комплекс расчёто-экспериментальных показателей: минимальная толщина смазочного слоя; максимальное давление в смазочном слое; максимальное давление на антифрикционный слой; максимальная температура в смазочном слое и на поверхности скольжения или температура антифрикционного слоя; коэффициент нагруженности подшипника. С износом и увеличением зазора в подшипнике несущая способность масляного клина снижается, и возникает опасность появления полусухого трения и прогрессирующего износа.

- Для непрерывного контроля технического состояния подшипников судовых МОД необходимо устанавливать и использовать «Систему контроля износов подшипников» (Bearing Wear Monitoring System). Система измеряет и отображает на мониторе в ЦПУ комбинированный физический износ рамовых мотылёвых и крейцкопфных подшипников, обеспечивая раннее предупреждение об увеличении скорости износа вкладышей.

- В соответствии с классификацией Германского Ллойда (Germanischer Lloyd) для исключения проверок со вскрытием подшипников МОД необходим мониторинг с использованием следующих систем: контроля износа подшипников

(Bearing Wear Monitoring System); измерения температуры подшипников (Crosshead and crank temperature monitoring); контроля воды в масле (Water in Oil sensor); устройство заземления коленчатого вала (Shaft Earthing Device); компьютеризированная система планового

обслуживания (Computerised Planned Maintenance System). При совместном использовании выше указанных систем мониторинга значительно снижаются риски непредсказуемых расходов на ремонт, а также затраты при проверках подшипников (инспекция без разборки).

### Литература

- Сорокин В.А. Эксплуатация, ремонт и приработка крейцкопфных подшипников малооборотных дизелей. Мор. трансп.: Сер. Техн. эксплуатация флота: Экспресс-информ. – М. – 1991. – Вып. 9 (749). – С. 1-10.
- Захаров Г.В. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок. М.: ТрансLit, 2009. – 256 с.
- Трение, изнашивание и смазка: Справочник / Под ред. Крагельского И.В., Алисина В.В. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
- Малиновский М.А., Фока А.А., Ролинский В.И., Вахрамеев Ю.З. Обеспечение надёжности судовых дизелей. – Одесса. ФЕНИКС, 2003. – 150 с.
- Корнилов Э.В., Фока А.А., Бойко П.В., Голофастов Э.И. Судовые главные двигатели с электронным управлением. – Одесса, «Экспресс-Реклама», 2010. – 224 с.
- Гаврилов В.В., Машченко В.Ю. Принципы построения иерархического комплекса систем диагностирования судового дизеля. Вестник Гос. университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, СПб. – 2016. – № 3 (37). – С. 155-166.
- Соловьёв А. В. Принципы формирования компьютерной модели диагностирования технического состояния судовой энергетической установки. Вестник Гос. университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, СПб. – 2018. – №1(47). – С. 238-251.
- Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Принципы построения системы информационной поддержки для принятия решений в аварийных ситуациях. Морские интеллектуальные технологии, 2009, №1(3). – С. 48-56.
- Астреин В.В., Кондратьев С.И., Боран-Кешишьян А.Л. Концепция построения перспективной системы поддержки принятия решений в области безопасности судоходства. Эксплуатация морского транспорта. Гос. морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск. – 2017. – №3. – С. 3-11.
- Полковникова Н.А., Полковников А.К. Модели и алгоритмы системы поддержки принятия решений для главного судового двигателя. Эксплуатация морского транспорта. Гос. морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск. – 2018. – №3 (88). – С. 86-102.
- Самойленко А.Ю., Полковников А.К. Температурный контроль крейцкопфных подшипников судовых МОД. Наука Кубани. Краснодар, – 1997. – №1. – С. 12-16.
- Равин А.А., Хруцкий О.В. Прогнозирование технического состояния оборудования: монография – Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. – 141 с.
- Шишкин В.А. Анализ неисправностей и предотвращение повреждений судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1986. – 192 с.

### References

- Sorokin V.A. Ekspluatatsiya, remont i prirabotka kreytskopfnykh podshipnikov malooborotnykh dizeley [Operation, repair and running-in of crosshead bearings of low-speed diesel engines]. Mor. transp.: Ser. Tekhn. ekspluatatsiya flota: Ekspres-inform. – M. – 1991. – Vyp. 9 (749). – S. 1-10.
- Zakharov G.V. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya sudovykh dizel'nykh ustanovok [Technical operation of marine diesel installations]. M.: TransLit, 2009. – 256 s.
- Trenie, iznashivanie i smazka [Friction, wear and lubrication]: Spravochnik / Pod red. Kragel'skogo I.V., Ali-sina V.V. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 400 s.
- Malinovskiy M.A., Foka A.A., Rolinskiy V.I., Vakhrameev Yu.Z. Obespechenie nadezhnosti sudovykh dizeley [Ensuring the reliability of marine diesel engines]. – Odessa. FENIKS, 2003. – 150 s.
- Kornilov E.V., Foka A.A., Boyko P.V., Golofastov E.I. Sudovye glavnye dvigateli s elektronnym upravleniem [Marine main engines with electronic control]. – Odessa, «Ekspress-Reklama», 2010. – 224 s.
- Gavrilov V.V., Mashchenko V.Yu. Printsipy postroeniya ierarkhicheskogo kompleksa sistem diagnostirovaniya sudovogo dizelya [Principles of hierarchical complex systems of diagnosing marine diesel engine]. Vestnik Gos. universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, SPb. – 2016. – № 3 (37). – S. 155-166.
- Solov'ev A. V. Printsipy formirovaniya kom'yuternoy modeli diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya sudovoy energeticheskoy ustanovki [The principles of forming a computer model of diagnosing the technical condition of marine power plants]. Vestnik Gos. universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, SPb. – 2018. – №1(47). – C. 238-251.
- Skorokhodov D.A., Starichenkov A.L. Printsipy postroeniya sistemy informatsionnoy podderzhki dlya prinyatiya resheniy v avariynikh situatsiyakh [Principles of building an information support system for decision-making in emergency situations]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2009, №1(3). – S. 48-56.
- Astrein V.V., Kondrat'ev S.I., Boran-Keshish'yan A.L. Kontseptsiya postroeniya perspektivnoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v oblasti bezopasnosti sudokhodstva [Concept of constructing a perspective system for decisions support in the field of safety of navigation]. Ekspluatatsiya morskogo transporta. Gos. morskoy universitet im. admirala F.F. Ushakova, Novorossiysk. – 2017. – №3. – S. 3-11.
- Polkovnikova N.A., Polkovnikov A.K. Modeli i algoritmy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy dlya glavnogo sudovogo dvigatelya [Models and algorithms of the decision support system for main marine diesel engine].

- Ekspluatatsiya morskogo transporta. Gos. morskoy universitet im. admirala F.F. Ushakova, Novorossiysk. – 2018. – №3 (88). – S. 86-102.
11. Samoylenko A.Yu., Polkovnikov A.K. Temperaturnyy kontrol' kreytskopfnykh podshipnikov sudovykh MOD [Temperature control of crosshead bearings of marine low-speed diesel engines]. Nauka Kubani, Krasnodar. – 1997. – №1. – S. 12-16.
12. Ravin A.A., Khrutskiy O.V. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Forecasting the technical condition of equipment]: monografiya – Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. – 141 s.
13. Shishkin V.A. Analiz neispravnostey i predotvratshchenie povrezhdeniy sudovykh dizeley [Fault analysis and damage prevention for marine diesel engines]. – M.: Transport, 1986. – 192 s.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Анатолий Карпович Полковников**, 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: polkov5@mail.ru

**Наталья Анатольевна Полковникова**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационные технологии», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru

**Anatoly K. Polkovnikov**, Ph.D. (Eng), assistant professor of Operation of ship mechanical installations department, Admiral F.F. Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, Lenin's avenue, 93, e-mail: polkov5@mail.ru

**Natalia A. Polkovnikova**, Ph.D. (Eng), assistant professor of Radio engineering and information technologies department, Admiral F.F. Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, Lenin's avenue, 93, e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Научная статья

УДК 629.12:621.396.9

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.015>

### Применение методов обработки сигналов в частотной области при анализе данных систем автоматического управления движением судов

Е.Б. Амбросовская<sup>1,2</sup> e-ambr@mail.ru, В.М.Амбросовский<sup>1</sup> v-ambr@mail.ru,

Д.В.Ромаев<sup>2</sup> d.romaev@navisincontrol.com, Д.В.Калимов<sup>1</sup> dkalimov1@gmail.com

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И.Ульянова (Ленина),

<sup>2</sup>Навис

**Аннотация.** Работа посвящена обработке данных в частотной области. Методы обработки в частотной области (преобразование Фурье, вейвлет-преобразование) широко используются в различных областях техники. В работе описаны особенности обработки данных навигационных датчиков и систем определения местоположения в задачах настройки систем автоматического управления движением, а также в задаче диагностики работы этих систем. В работе приведен алгоритм применения преобразования Фурье с использованием оконных функций для сглаживания и дифференцирования сигналов в частотной области, показано, как различные параметры оконных функций влияют на свойства получаемых сигналов. Приведены примеры обработки натурных записей работы системы динамического позиционирования. Для анализа сигналов с меняющимися во времени свойствами показано, как использовать вейвлет-преобразование, как оказывается выбор вейвлета. На натурных данных показано, как проявляются особенности работы системы (изменение частоты максимума возмущения, раскачка системы, скачки в данных) на вейвлет-спектrogramмах (скалограммах).

**Ключевые слова:** динамическое позиционирование, управление движением, система управления курсом судна, волновое возмущение, преобразование Фурье, оконная функция, спектр, спектrogramма, вейвлет

**Для цитирования:** Амбросовская Е.Б., Амбросовский В.М., Ромаев Д.В., Калимов Д.В. Оценка эффективности обеспечения экологической безопасности персонала судна, Морские интеллектуальные технологии 2022. № 2 часть 1. С. 112—119.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.015>

### Frequency-domain signal processing applications in ship motion control systems

Elena B. Ambrosovskaya<sup>1,2</sup> e-ambr@mail.ru, Victor M. Ambrosovsky<sup>1</sup> v-ambr@mail.ru,

Dmitry V. Romaev<sup>2</sup> d.romaev@navisincontrol.com, Daniil V. Kalimov<sup>1</sup> dkalimov1@gmail.com

<sup>1</sup> St. Petersburg state Electrotechnical University “LETI”, <sup>2</sup>Navis, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The paper reviews frequency-domain signals processing for marine applications. Frequency-domain methods (Fourier transform, wavelet transform) have a wide field of application in engineering. In the present paper specialties of these methods application in navigation data processing are discussed. Problems of data smoothing, numeric n-order derivation are discussed, application of windowing functions is shown as well as approach to these windowing functions parameters selecting is demonstrated on sea trials data processing, in examples of yaw rate data smoothing and yaw acceleration obtaining from heading measurements. Wavelet scalograms of different navigational data records are shown. It is demonstrated how the specialties of automatic motion control system operation (like disturbance frequency-band changing, oscillation with growing magnitude, jumps in reference-systems data, manoeuvring) can be found in the wavelet scalograms.

**Keywords:** dynamic positioning, motion control, heading control system, wave disturbance, Fourier transform, windowing functions, spectrum, scalogram, wavelet transform

**For citation:** Elena B.Ambrosovskaya, Victor M.Ambrosovsky, Dmitry V.Romaev, Daniil V.Kalimov, Frequency-domain signal processing applications in motion control systems, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 112—119.

#### Введение

Системы автоматического управления движением судов включают в себя системы управления судном по курсу (авторулевые)[1, 3], системы координированного управления (джойстиковые системы, системы динамического позиционирования (ДП))[1, 2], а также системы

демпфирования качки судна и разнообразные системы управления движением со специализированной функциональностью [10]. Как правило системы эти разделены (отчасти вследствие того, что в подсистемы должны быть независимы и сертифицируются отдельно), однако, в некоторых случаях система управления движением судна может объединять в себе несколько задач

управления – от управления по курсу до демпфирования качки и автомата безопасности [4].

При настройке систем управления движением (которая проводится на борту или удаленно, иногда в автоматическом режиме) проводится идентификация параметров математической модели. Так например, часто при автонастройке авторулевого проводится маневр типа «зигзаг» и далее определяются параметры упрощенной математической модели – различные варианты таких алгоритмов реализованы во многих авторулевых, один из вариантов алгоритма описан в [5]. При настройке системы динамического позиционирования инженер также проводит различные маневры, которые позволяют оценить как гидродинамику судна, так и параметры эффективности средств управления движением. При обработке данных для идентификации модели требуется определить по координатам и углам скорости и ускорения без внесения дополнительного запаздывания и очистить их от шумов измерений для надежной идентификации. Для этого используют обработку сигналов в частотной области.

При удаленной диагностике систем требуется быстро диагностировать проблемные ситуации. Современные автоматические системы часто имеют систему постоянной записи на диск или отдельный компьютер для дальнейшего анализа инцидентов и деградации системы, в этом случае экспресс-обработка этих записей могла бы позволить выделить некоторые особенности или проблемы и сообщить об этом оператору или удаленно разработчику. К таким проблемам может относиться раскачка системы в некоторых режимах (вследствие изменившихся свойств системы или неправильных действий оператора, например, неверно выбранных настроек параметров), плохое качество работы приводов средств управления (появление задержек и снижение скорости перекладки [6] или появление колебательности), плохая работа датчиков или систем определения местоположения. И тут обработка сигналов в частотной области может помочь выделить особенности и в дальнейшем подготовить данные к классификации особенностей с использованием нейросетей. Схожие подходы применялись в работе [13] для диагностики проблем при работе ветрогенераторов.

Кроме того, некоторым системам полезна подстройка к частотному составу возмущения. Частотные методы могут позволить выделить полосу существенных частот возмущения, даже если она вследствие маневрирования судна будет переменной во времени – так как волновое возмущение, которое действует на судно, меняет свои спектральные свойства при смене угла встречи с волной и скорости хода судна [3,14]. Поэтому при решении задач оценивания/фильтрации и управления движением полезно иметь возможность диагностировать изменение спектрального состава возмущения по измерениям кинематических параметров.

Рассмотрим методы обработки сигналов в частотной области.

### Преобразование Фурье

При обработке данных испытаний судов и выполнении различных вычислений в процессе их настройки (оффлайн-обработка данных, хотя и часто это происходит на борту) широко используется преобразование Фурье (ПФ) [7]. На практике

применяют алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ, fft), который пригоден для дискретных (с постоянным шагом дискретизации) и периодических во времени сигналов:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left\{-\frac{j2\pi kn}{N}\right\}$$

Получаемые значения  $X_k$  соответствуют частотам  $f_k = \frac{k}{(N-1)2h} \in [-\frac{1}{2h}, \frac{1}{2h}]$ , где  $h$ -период дискретизации. Обратное преобразование Фурье имеет вид

$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left\{\frac{j2\pi kn}{N}\right\}$$

Основное, для чего мы можем использовать преобразование Фурье – сглаживание сигналов без внесения запаздывания во времени и численное дифференцирование сигналов (определение скоростей и ускорений по измерениям координат, угловых скоростей и угловых ускорений по измерениям углов). При этом возникают и артефакты, связанные в основном с тем, что скачки во временной области вызывают колебания в частотной области и наоборот и как следствие – часто можно получить избыточную колебательность в результате обработки, от чего можно частично избавиться грамотно подбрав оконную функцию [7].

Кроме того, при обработке измерений мы имеем дело с редкими неравномерно идущими по времени измерениями. Так, измерения GPS/GLONASS приемника приходят один раз в секунду, измерения гирокомпаса 5-10 раз в секунду, измерения спутникового компаса 1-5 раз в секунду. Как правило, данные от большинства датчиков идут с постоянным шагом (за исключением данных от гидроакустических систем определения местоположения), но некоторые измерения могут не доходить (выпадать), так как передача данных как правило происходит по последовательным портам. Перед применением преобразования Фурье важно получить данные, соответствующие равномерно идущим отсчетам времени. Это делают, например, используя линейную интерполяцию, можно и фиксировать значения – решение нужно принимать по физическому смыслу сигнала.

Рассмотрим использование преобразования Фурье для сглаживания или дифференцирования сигналов навигационных датчиков. Дифференцирование требуется для определения скоростей и ускорений. Итак, пусть имеется запись сигнала  $x(t)$  в точках  $t = t_i \in [t_1, t_2]$ .

1. Вычтем постоянную и линейный тренд из сигнала, получив сигнал  $y(t) = x(t) - x(t_1) - (x(t_2) - x(t_1))(t - t_1)/(t_2 - t_1)$ .
2. Введем замену времени  $\tau = t - t_1$ . Сигнал  $y(\tau)$  на концах интервала равен нулю и может быть рассмотрен как фрагмент периодического сигнала.
3. Помимо вычитания линейного тренда можно удлинить сигнал, например, при помощи симметризации или антисимметризации – дополнив его слева симметрично (или антисимметрично) отраженным относительно начала сигнала. Такие действия приводят с уменьшению искажений, которые неизбежно

- происходят на краях сигнала (но также увеличиваются необходимую память).
4. Применим к отсчетам сигнала  $y(t)$  алгоритм БПФ и получим комплексную функцию  $Y(f)$  для частот  $f \in [-\frac{1}{2h}, \frac{1}{2h}]$ , где  $h$  - период дискретизации
  5. Далее преобразование Фурье умножается на частотное окно  $W(f)$ , то есть вещественную функцию частоты, которая определена на промежутке  $[-f_{max}, f_{max}]$ . Существуют различные виды оконных функций, мы ниже рассмотрим как влияет выбор параметра  $f_{max}$  и вида оконной функции
  6. Если требуется дифференцировать порядка  $k$ , то еще столько раз домножаем на  $j2\pi f$ :  $Y_1(f) = Y(f)W(f)(j2\pi f)^k$
  7. Затем, применив обратное БПФ, получаем сигнал  $y_f(t)$ , к которому добавляем (если это сглаживание) исходный линейный тренд и постоянное значение, если же это производная – добавляем производную этого тренда.

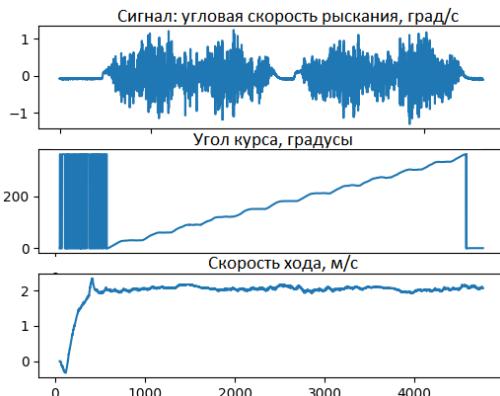


Рис.1. Маневрирование судна в ходе эксперимента 1

Данный алгоритм давно и успешно используется при обработке данных, но хотелось бы обратить внимание на некоторые проблемы и выбор параметров.

Рассмотрим данные моделирования высокоскоростного маневра судна (рис.1), моделируется данные угловой скорости блока инерционных датчиков. В ходе маневра судно шло в режиме «высокоскоростной джойстик» с удержанием курса, который изменялся ступенчато. Скорость, курс и угловая скорость показаны на рис.1.

Проведем сглаживание данных угловой скорости в частотной области (рис.2,3).

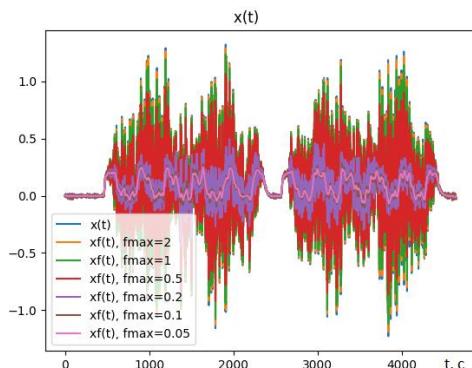


Рис.2. Сглаживание сигнала датчика угловой скорости. Влияние частоты максимума окна

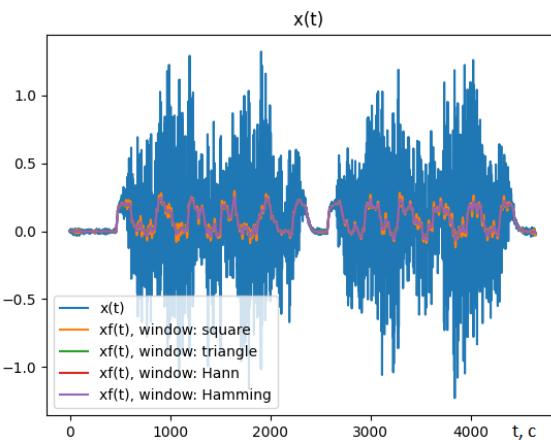


Рис.3. Сглаживание сигнала датчика угловой скорости. Влияние оконной функции

Как видно из рис.2, без обработки или при недостаточном сглаживании не видна даже сущность движения, преобладает шум в виде «бороды». Как видно из рис.3 (частота максимума выбрана 0.05), необходимо использовать окно – например, Ханна или Хэмминга.

Существует также особенность при определении ПФ для сигналов типа угла курса, то есть угла, который меняется в круговом диапазоне 0..360 градусов. В этом случае следует «развернуть» в бесконечный диапазон перед фильтрацией и дифференцированием, в противном случае точка перехода через 360 градусов будет воспринята как точка скачка (такая точка хорошо видна, например, на рис.1).

Рассмотрим задачу дифференцирования сигнала в частотной области на примере обработки натуральных данных. На рис.4. показан сигнал курса (запись данных гирокомпаса) в ходе тестового маневра системы динамического позиционирования Navis NavDP 4000, управление носовым туннельным ПУ. Маневр колебательный, задача для идентификации – определить угловую скорость и ускорение во время маневра.



Рис.4. Курс во время маневра, эксперимент 2

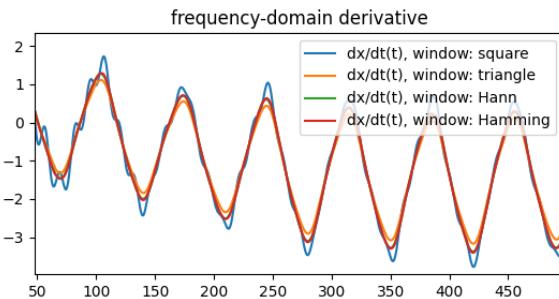


Рис.5. Дифференцирование курса, влияние вида оконной функции

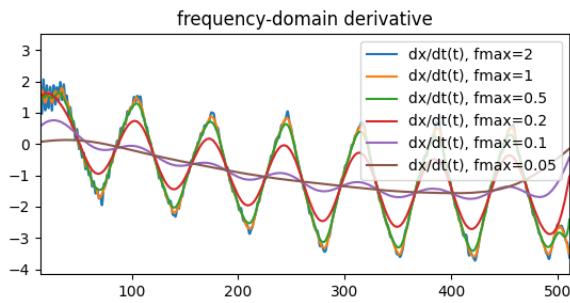


Рис.6. Дифференцирование курса. Влияние частоты максимума оконной функции.

На рис.5-6 показаны результаты дифференцирования сигнала курса в частотной области с различными параметрами, на рис.7-8 – результаты определения второй производной угла курса (углового ускорения), особенно ценные на практике, так как показывают действующую суммарную силу (момент) на судно.

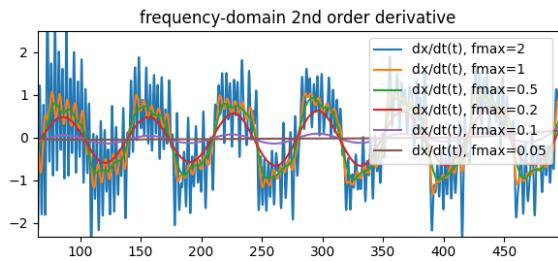


Рис.7. Определение второй производной, влияние частоты максимума оконной функции

Как видно из этих рисунков - если при обработке занизить частоту максимума окна – теряется информация о колебаниях, если завысить – появляется «борода» в сигнале. Можно принять для данного маневра удовлетворительной частоту максимума окна 0.5 и окна Ханна или Хэмминга.

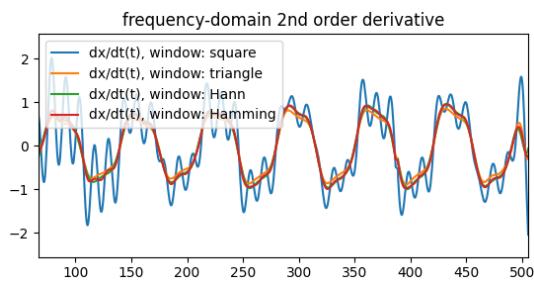


Рис.8. Определение второй производной, влияние вида оконной функции

В некоторых случаях при неудачно проведенном маневре невозможно достоверно оценить ускорение, поэтому такая обработка возможна не во всех случаях.

Помимо сглаживания и дифференцирования в частотной области при помощи применения последовательно прямого и обратного ПФ, на практике используют оценку спектра по реализации:

$$S(f) = |X(f)|^2$$

Если запись процесса достаточно длинная – можно использовать как технику коррелограмм так и технику периодограмм с осреднением по перекрывающимся интервалам. В этом случае мы предполагаем, что спектр не меняется от времени

(сигнал стационарный) и можно оценивать преобразование Фурье на коротких временных интервалах, а затем осреднять результат.

Рассмотрим качку судна в условиях маневрирования. На рис.9. показан фрагмент часовой записи угла крена в ходе испытаний и оцененный спектр сигнала угла крена при движении с переменной скоростью хода. Спектр оценен по методу периодограмм на перекрывающихся на 75% интервалах, длина интервалов указана на рисунке.

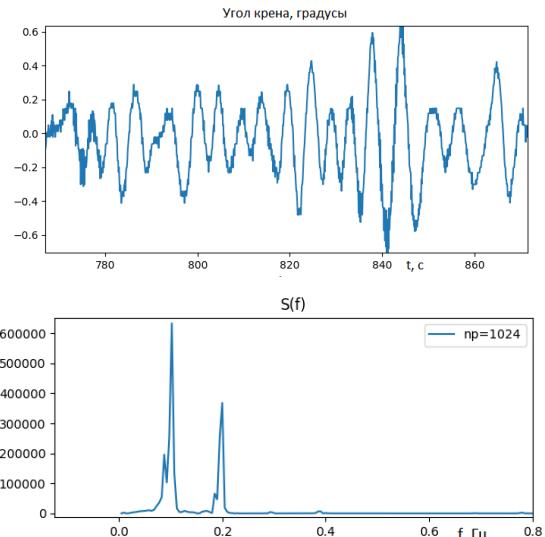


Рис.9 Угол крена и оценка его спектра

Используя полученный спектр, можно судить о полосе существенных частот сигнала. Однако, часто спектр оказывается недостаточно гладким и «на глаз» полоса частот определяется плохо. В этом случае целесообразно использовать технику [12] – определять величину безразмерной энергии

$$E(f) = \int_0^f S(\varphi) d\varphi / \int_0^\infty S(\varphi) d\varphi$$

Функция  $E(f)$  – неубывающая функция частоты, что позволяет определить полосу частот сигнала, задав необходимый уровень, например, в % (рис.10).

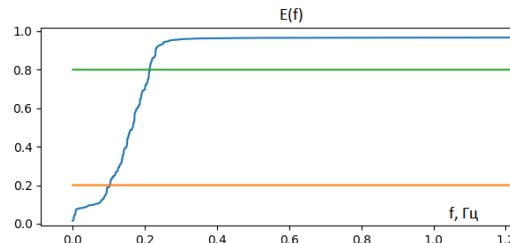


Рис.10. Определение полосы существенных частот сигнала, измерения угла крена

#### Фурье-спектрограммы

Если во время эксперимента судно маневрирует и частотные свойства сигнала меняются от времени, оцененный спектр получается неоправданно размазанным и судить о свойствах сигнала по нему трудно. В этом случае можно использовать технику оконных преобразований Фурье без осреднения, а строя спектрограммы (STFT, short-time Fourier Transformation [9]) – зависимости спектра от времени – так, как это показано на рис.11.

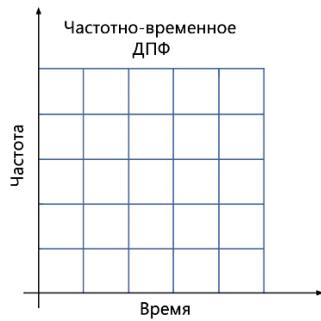


Рис.11. Частотно-временное преобразование Фурье (Фурье-спектрограмма)

Для удобства восприятия используют также вариант, когда по вертикальной оси отложен период

Однако это достаточно трудоемкие вычисления и в таких случаях как правило используют другую технику – вейвлет-преобразования [8, 9]. Тем более что равномерное разбиение на ячейки в частотно-временной (фазовой) области неоправданно – так как согласно принципу неопределенности, чем лучше функция сконцентрирована во времени, тем больше она "размазана" в частотной области [15].

### Вейвлет-преобразование

Непрерывное вейвлет-преобразование [8, 9]  $X_w(\tau, s)$  определяется соотношением:

$$X_w(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right) dt$$

Здесь вейвлет-функция («материнский вейвлет»)  $\psi(t)$ , параметр масштаба  $s$ ,  $*$  – обозначение комплексной сопряженности. По сути это свертка сигнала с вейвлет-функцией, где вейвлет-функция – ограниченная во времени в общем случае комплексная функция, равная нулю на концах, интеграл от этой функции также равен нулю. Вейвлет-функции различаются по виду [8, 9]. Для сигнала, который конечен во времени и измерен в дискретные моменты времени  $t_i$  интеграл (свертки с ядром  $\psi^*$ ) превращается в конечную сумму.

Вейвлет-преобразование позволяет исследовать поведение спектрального состава сигнала во времени. Вейвлет-преобразование покрывает фазовую плоскость ячейками одинаковой площади, но разной формы [8, 9] (рис.12). Это позволяет хорошо локализовать низкочастотные детали сигнала в частотной области (преобладающие гармоники), а высокочастотные – во временной (резкие скачки, пики и т.п.).

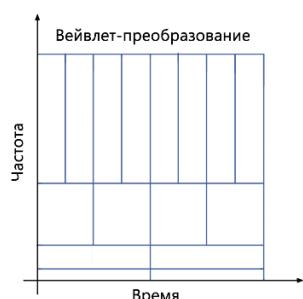
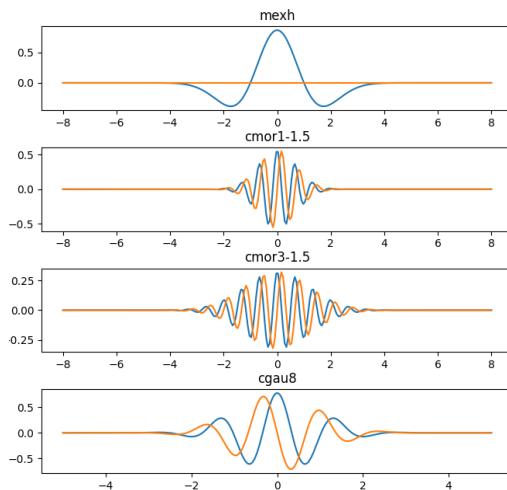


Рис.12. Вейвлет-скалограмма в частотно-временной области

В практике обработки сигналов используют различные вейвлет-функции (как вещественные так и комплексные), некоторые из которых приведены на рис.13.



. Рис.13. Вейвлеты различных типов

Рассмотрим результаты обработки при помощи вейвлет-преобразования реальных записей работы систем автоматического управления движения в различных режимах.

Один из типичных случаев – маневрирование на волнении. На рис.14 показана спектрограмма сигнала рыскания при маневрировании (эксперимент 1). На рисунке хорошо виден переменный спектральный состав сигнала. Здесь применен вейвлет смог2-1.5. Хорошо видно, что спектр сигнала достаточно узкий, но с переменной частотой максимума ввиду маневрирования.

Рассмотрим влияние выбора вейвлета на характер вейвлет-спектрограммы. Основные параметры вейвлетов – степень его «размазанности» во времени и для колебательных вейвлетов – соотношение этой размазанности и «несущей частоты». На рис.15, 16 приведены спектрограммы для вейвлетов типа сгай8, megh

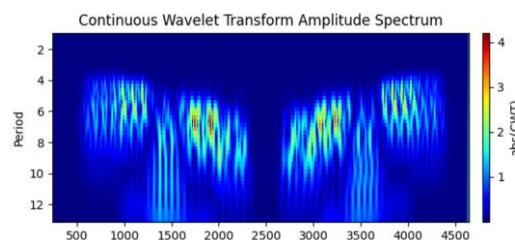


Рис.14. Вейвлет-спектрограмма рыскания на волнении, вейвлет смог2-1.5

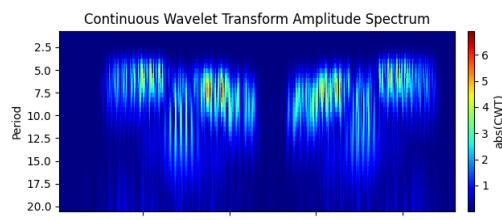


Рис.15. Вейвлет-спектрограмма рыскания на волнении, вейвлет сгай8

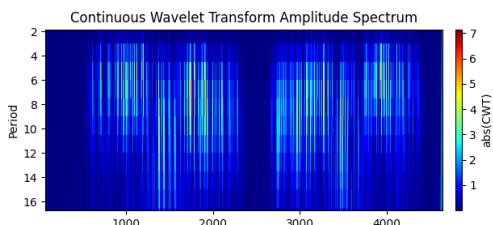


Рис.16. Вейвлет-спектрограмма рыскания на волнении, вейвлет mexh

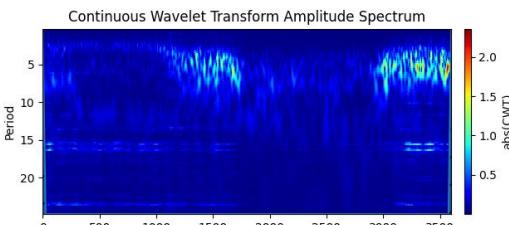


Рис.17. Вейвлет-спектрограмма дифферента на волнении, вейвлет stmr2-1.5

На рис.17 приведена вейвлет-спектрограмма кильевой качки судна (экспериментальные данные) при маневрировании. На скалограмме хорошо виден изменяющийся период максимума спектра в процессе маневрирования судна, присутствуют и постоянные частоты.

Помимо изменяющегося спектрального состава, при помощи вейвлет-преобразования можно увидеть нестационарные особенности в сигнале. Так, например, на рис.18 показан пример работы системы динамического позиционирования с использованием датчика типа «натянутый трос», в районе 100 секунды произошла явная раскачка системы, что видно на скалограмме рис.19

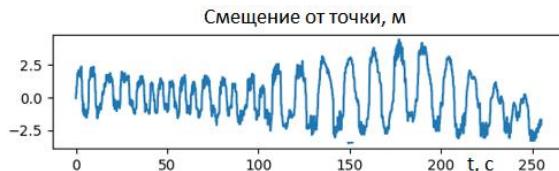


Рис.18. Изменение смещения на север от точки позиционирования

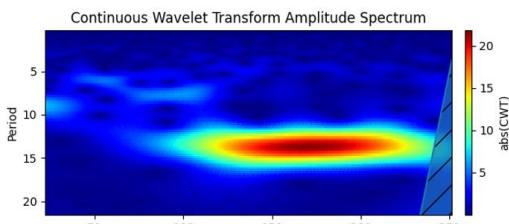


Рис.19 Скалограмма координаты в случае раскачки системы.

То есть можно сказать, что появление особенностей в виде горизонтальных эллипсов говорит, что в системе произошла раскачка и известен ее период.

При скачках в данных, характерных для GPS/GLONASS данных, в спектре присутствуют все частоты (вертикальная полоса 320, 410 сек. и пр.) - рис.21

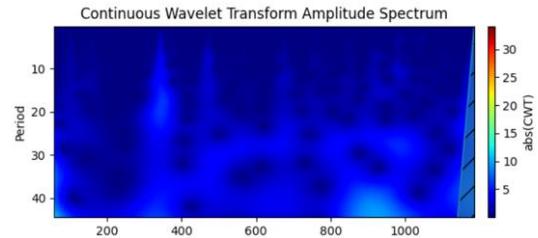


Рис.21. Скалограмма координат при скачках в данных

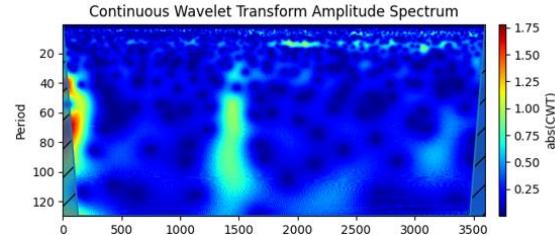


Рис.21. Скалограмма координат при маневрировании

Эти ситуации достаточно легко отличить от маневрирования – так как при маневрировании в скалограмме присутствуют частоты (периоды), соответствующие не всем, а лишь достаточно низкочастотным движениям (как это показано на рис.21) – маневрированию соответствуют вертикальные полосы с периодом более 20с.

Следует отметить, что в данный момент хорошо проработана техника классификации изображений при помощи нейросетей, поэтому выделение таких особенностей сигналов на скалограммах может помочь классифицировать эти особенности автоматически при помощи классифицирующих нейросетей.

## Заключение

В работе описаны особенности обработки данных навигационных датчиков и систем определения местоположения в задачах настройки систем автоматического управления движением, а также в задаче диагностики работы этих систем. В работе приведен алгоритм применения преобразования Фурье с использованием оконных функций для сглаживания и дифференцирования сигналов в частотной области, показано, как различные параметры оконных функций влияют на свойства получаемых сигналов. Кроме того, в работе показано, как проявляются особенности работы систем на вейвлет-спектрограммах (скалограммах).

Все вычисления проведены при помощи пакета pywavelets и пакета numpy, python. Следует отметить, что многие исследователи при обработке данных традиционно используют среду MATLAB. В последние годы программное обеспечение MATLAB имеет существенные ограничения на использование, ограничивающие даже образовательные и платные лицензии. В связи с этим Octave, имеющий синтаксис MATLAB, и кросс-платформенную реализацию (Windows/Linux), а также онлайн web-решение, все более привлекательен. Однако, в случае, если требуется создание оффлайн-работающих утилит разработчика или собственных приложений – целесообразно использовать python с библиотеками numpy/matplotlib. Это уже стало стандартом де-факто у многих групп исследователей в мире. Авторы

полагают, что использование свободно распространяемого программного обеспечения – языка python и научных пакетов к нему – имеет большие перспективы.

### Литература

1. Fossen, Thor. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control.// John Wiley & Sons, 2011
2. H. Fay, Dynamic Positioning Systems, Principles, Design and Applications. // Paris, France: Editions Technip, 2005
3. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами. //Л.: Судостроение, 1988. - 272 с., ил.
4. Амбросовский В.М. Амбросовский Ю.В., Харченко К.А. Система управления движением пассажирских судов на воздушной подушке. //Современные технологии автоматизации, N3, 2017 г., с.22-26.
5. Tomera, Miroslaw. (2017). Fuzzy Self-tuning PID Controller for a Ship Autopilot. // Proceedings of the 12th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, TransNav 201721-23 June 2017, Gdynia, Poland, pp 93-103.
6. Е. Б. Амбросовская, Д. В. Калимов. Определение параметров привода органов управления в системе динамического позиционирования с целью раннего обнаружения отказа // материалы XXIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием, Санкт-Петербург, 16–19 марта 2021 года – С. 262-264.
7. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов. // М.:Бином пресс, 2006.
8. Torrence, Christopher, Compo, Gilbert P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. //Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 79, Issue 1, pp.61-78
9. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. 1999
10. Loginov, A. Proskurnikov, E. Ambrosovskaya, D. Romaev DP systems for track control of dredging vessels // 9th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, MCMC 2012, Arenzano, 2012 – IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – P. 453-458.
11. E. Ambrosovskaya, D. Romaev, A. Loginov, A.Mordvinsev, A.Miroshnikov. Deep integration of INS and DP: From theory to experiments // 13<sup>th</sup> IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, IFAC-PapersOnLine : 13th, Oldenburg, 2021. – P. 132-138
12. Е. Б. Амбросовская, Д. В. Калимов, Е. В. Попова Оценивание полосы частот действующего на судно волнового возмущения по результатам экспериментальных данных // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2020 : Материалы Юбилейной международной-научно практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2020 год . – С. 94-99.
13. E. H. Bouchikhi, V. Choqueuse, M. E. H. Benbouzid, J. F. Charpentier and G. Barakat, "A comparative study of time-frequency representations for fault detection in wind turbine," IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011, pp. 3584-3589
14. Podgorski, Krzysztof & Rychlik, Igor & Machado, Ulla. (2000). Exact distributions for apparent waves in irregular seas. Ocean Engineering. 27. 979-1016.
15. Bruce, L.M., Cheriyadat, A., Burns, M.: Wavelets: Getting perspective. //IEEE Potentials 22(2), 24–27 (2003)

### References

1. Fossen, Thor. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control.// John Wiley & Sons, 2011
2. H. Fay, Dynamic Positioning Systems, Principles, Design and Applications. // Paris, France: Editions Technip, 2005
3. Lukomskij Yu.A., Chugunov V.S. Sistemy upravleniya morskimi podvizhnymi ob'ektami [Control systems for marine mobile objects]. //L.: Sudostroenie, 1988. - 272 s
4. Ambrosovskij V.M. Ambrosovskij YU.V., Harchenko K.A. Sistema upravleniya dvizheniem passazhirskih sudov na vozдушnoj podushke [Motion control system for passenger hovercrafts]. //Sovremennye tekhnologii avtomatizacii, N3, 2017 g., s.22-26.
5. Tomera, Miroslaw. (2017). Fuzzy Self-tuning PID Controller for a Ship Autopilot. // Proceedings of the 12th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, TransNav 201721-23 June 2017, Gdynia, Poland, pp 93-103.
6. E.B. Ambrosovskaya, D.V. Kalimov. Opredelenie parametrov privoda organov upravleniya v sisteme dinamicheskogo pozicionirovaniya s cel'yu rannego obnaruzheniya отказа [Actuators parameters estimation in the dynamic positioning systems for the purpose of early failure diagnostics] // materialy HXIII konferencii molodyh uchenyh «Navigaciya i upravlenie dvizheniem» s mezhunarodnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 16–19 marta 2021 goda – S. 262-264.
7. Lyons, Richard. Understanding Digital Signal Processing. //Addison-Wesely, 1999
8. Torrence, Christopher, Compo, Gilbert P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 79, Issue 1, pp.61-78
9. Vorob'ev V.I., Gribunin V.G. Teoriya i praktika vejvlet-preobrazovaniya [Theory and practice of wavelet transform]. 1999
10. A. Loginov, A. Proskurnikov, E. Ambrosovskaya, D. Romaev DP systems for track control of dredging vessels // 9th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, MCMC 2012, Arenzano, 2012 – IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – P. 453-458.
11. E. Ambrosovskaya, D. Romaev, A. Loginov, A.Mordvinsev, A.Miroshnikov. Deep integration of INS and DP: From theory to experiments // 13th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, IFAC-PapersOnLine : 13th, Oldenburg, 2021. – P. 132-138
12. Е. Б. Амбросовская, Д. В. Калимов, Е. В. Попова Оценивание полосы частот dejstvuyushchego na sudno volnovogo vozmushcheniya po rezul'tatam eksperimental'nyh dannyh [Wave disturbance frequency band

- estimation] // Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2020 : Materialy YUbiejnoj mezdunarodnoj-nauchno prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 10–11 noyabrya 2020 god . – S. 94-99.
13. E. H. Bouchikhi, V. Choqueuse, M. E. H. Benbouzid, J. F. Charpentier and G. Barakat, "A comparative study of time-frequency representations for fault detection in wind turbine," IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011, pp. 3584-3589
14. Podgorski, Krzysztof & Rychlik, Igor & Machado, Ulla. (2000). Exact distributions for apparent waves in irregular seas. Ocean Engineering. 27. 979-1016.
15. Bruce, L.M., Cheriadat, A., Burns, M.: Wavelets: Getting perspective. //IEEE Potentials 22(2), 24–27 (2003)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Елена Борисовна Амбросовская**, кандидат технических наук, доцент кафедры корабельных систем управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" В.И.Ульянова (Ленина), ул.Профессора Попова 5,197022; ведущий инженер-исследователь АО"Навис", 22 линия д 3,199106, e-mail: e-ambr@mail.ru

**Виктор Михайлович Амбросовский**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры корабельных систем управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" В.И.Ульянова (Ленина) ,ул.Профессора Попова 5,197022, e-mail: v-ambr@mail.ru

**Дмитрий Владимирович Ромаев**, старший инженер-исследователь АО"Навис", 22 линия, д 3,199106, e-mail: d.romaev@navisincontrol.com

**Даниил Валерьевич Калимов**, аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им.В.И.Ульянова (Ленина), ул.Профессора Попова,5, 197022, e-mail: dkalimov1@gmail.com.

**Elena B. Ambrosovskaya**, Ph.D. (Eng), Associate Professor St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), Professora Popova ,5, St. Petersburg, 197022, Russian Federation; Senior Research Engineer of Navis co, d.3, 22 liniya, St-Peterburg, 199106, Russian Federation, e-mail: e-ambr@mail.ru

**Viktor M. Ambrosovsky, Ph.D. (Eng)**, Associate Professor St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), 5, Professora Popova, St. Petersburg, 197022, Russian Federation, e-mail: v-ambr@mail.ru

**Dmitry V. Romaev** Research Engineer of Navis co, d.3, 22 liniya, St-Peterburg, 199106, Russian Federation, e-mail: d.romaev@navisincontrol.com

**Daniil V. Kalimov**, Ph,D student of St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), 5, Professora Popova , St. Petersburg, 197022, Russian Federation, e-mail: dkalimov1@gmail.com.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 06.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

**Научная статья**

УДК 629.12:681.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.016>

## **Система предотвращения аварий движения скоростных морских подвижных объектов**

**В.М.Амбросовский<sup>1</sup>** v-ambr@mail.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация.** В статье рассматривается подход к созданию систем предотвращения аварий движения скоростных морских подвижных объектов, к которым в первую очередь относятся морские подвижные объекты с динамическими принципами поддержания. Предлагаемый подход к разработке систем предотвращения аварий движения скоростных морских подвижных объектов заключается в том, что при разработке систем предотвращения аварий движения решаются две задачи: во-первых, определяется факт близости возникновения аварии движения, и во-вторых включается противоаварийный закон управления движением, обеспечивающий предотвращение аварии. Фактом возникновения аварии движения предложено считать выход параметров движения морского подвижного объекта за границу области безопасного движения. После выхода морского подвижного объекта за область безопасного движения решается задача возвращения объекта в область безопасных значений кинематических параметров. Достоинством систем предотвращения аварий движения, построенных по такому принципу, является отсутствие необходимости определения конкретного типа аварийной ситуации. В качестве примера рассмотрена система предотвращения аварий движения морского подвижного объекта на воздушной подушке с управлением по каналу дифферента, показана работа релейного и ПИД-регулятора, показано, как влияет динамика привода средств управления.

**Ключевые слова:** скоростной морской подвижной объект, проектирование систем управления движением и маневрированием, предотвращение аварий движения

**Благодарности:** автор выражает благодарность Е.Б.Амбросовской за помощь в оформлении и вычислениях и поддержку при работе над статьей

**Для цитирования:** Амбросовский В.М. Система предотвращения аварий движения скоростных морских подвижных объектов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 120—126.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.016>

## **Accident prevention of motion system for high-speed marine mobile objects**

**Victor M. Ambrosovsky<sup>1</sup>** v-ambr@mail.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article considers an approach to motion accidents prevention systems design for high-speed marine crafts. The proposed approach to the development of these systems is based on following idea: When developing motion accident prevention system, two tasks are solved. The first is determination of the fact of imminent motion accident. The second is activation of the automatic control algorithm that ensures the prevention of motion accident. It is proposed to determinate the fact of the imminent occurrence of a motion accident as the output of state variables from safety region in state-space. When high speed marine craft leaves the safety domain of the state space, control algorithm of returning state variables to safety region is being started. The advantage of this kind of motion accident prevention systems built on this principle is that there is no need to localize the fault for returning control object to the safety region. Safety region estimation based on Lyapunov function is proposed. Accident prevention controller with minimum travel time returning to safety region is considered. As an example, control law for preventing accidents in the movement of an air cushion vehicle pitching is considered, bang-bang and PID controller simulation results are presented, actuator dynamics influence is considered.

**Acknowledgments:**

**Keywords:** high-speed marine mobile object, design of motion control and maneuvering systems, prevention of motion accident

**For citation:** Victor M. Ambrosovsky Accident prevention of motion system for high-speed marine mobile objects, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 120—126.

### **Введение**

Системы предотвращения аварий движения (СПАВ) или автоматы безопасности движения скоростных морских подвижных объектов (МПО) являются важнейшими системами, предназначенными для обеспечения безопасности скоростных МПО, подверженных авариям движения [1, 2]. Это в первую очередь относится к скоростным МПО с динамическими принципами поддержания.

Так, в таблице 1 приведены основные причины неустойчивости и аварий движения по данным [2].

СПАВ являются частью системы управления движением, и основной предлагаемый подход к созданию СПАВ заключается в том, что СПАВ решаются две задачи: определяется факт возникновения аварии движения и включается автоматическая система, обеспечивающая предотвращение аварии движения (вывод из области опасных кинематических параметров).

Соответственно, синтез законов управления СПАВ включает две задачи. Во-первых - задача определения области безопасного движения МПО. Фактом возникновения аварии движения будем считать выход параметров движения МПО за границу области безопасного движения МПО. Во-вторых - после выхода МПО за область безопасного движения решается задача возвращения МПО в область безопасного движения (рис.1).

Достоинством СПАВ, построенной по такому принципу, является отсутствие необходимости определения конкретного типа аварийной ситуации, независимо от конкретной причины возникновения аварии, так как нужно установить лишь факт ее возникновения, что приводит к большому быстродействию данной системы при прочих равных условиях.



Рис. 1. Схема работы алгоритмов СПАВ

Рассмотрим структуру СПАВ и особенности ее алгоритмов на примере системы управления судном на воздушной подушке (СВП) амфибийного типа.

#### Система управления движением и система предотвращения аварий СВП

Комплексная система управления движением СВП [4] решает задачи следящего управления от рукояток управления, а также автоматического управления по курсу, по маршруту, алгоритмы координированного управления. В системе разработки АО ИЦ ИУС (Санкт-Петербург) разработанный автором алгоритм предотвращения аварий является частью системы, реализован на том же вычислителе, что и остальные алгоритмы управления. Структура системы показана на рис.2.

Таблица 1

Потеря устойчивости Задача безопасности	Тип МПО					
	Однокорпусное	Катамаран	СПК/СВП			
Изменение ЦТ на волнении	X					
«Вспахивание» в скоростной волне	X		X			
«Зарывание» носа на высокой скорости хода		X		X		X
Поперечная неустойчивость на циркуляции		X				X X
Потеря способности держать курс	X		X			X X
Перемещение или потеря устойчивости при брочинге	X	X	X	X	X	X X
Отказ системы управления					X	
Подлом ГО						X
Выход из воды		X				
Внезапный крен	X	X				
Удары сктолы		X				
Опускание носа	X					X

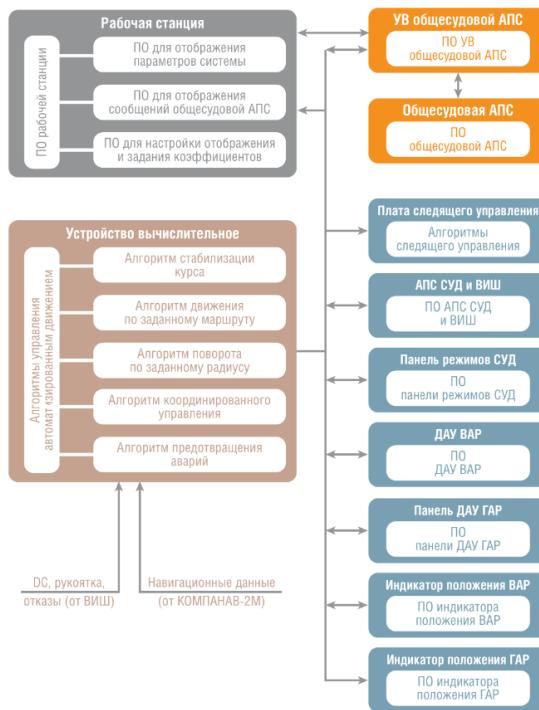


Рис. 2. Алгоритм предотвращения аварий как часть системы управления движением амфибийного СВП

Рассмотрим способы оценки области безопасного движения.

#### Оценка области безопасного движения

В качестве оценки области безопасного движения предлагается использовать область притяжения балансировочного режима движения МПО [2], [Ошибка! Источник ссылки не найден.], [Ошибка! Источник ссылки не найден.], [6]. Задачу определения области притяжения балансировочного режима движения МПО решим с использованием метода функций Ляпунова [2].

В качестве функции  $V$  целесообразно использовать квадратичную функцию Ляпунова:  $V = \sum_{j=1}^k V_j$ ,  $V_j = x^T B_j x$ , где каждая матрица  $B_j$  есть положительно определенная матрица.

Квадратичные функции Ляпунова, вследствие своей простоты, позволяют синтезировать легко реализуемые алгоритмы управления.

Проблема нахождения области асимптотической устойчивости может быть сведена к решению уравнений:

$$\nabla V + \lambda \nabla \dot{V} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{V} < 0 \quad (2)$$

где  $\lambda$  - множитель Лагранжа.

В качестве примера рассмотрим уравнение килевой качки МПО на воздушной подушке (ВП) амфибийного типа которое имеет вид [6]:

$$m\omega_z + b\omega_z + f(\psi) = m_u + m(t), \quad (3)$$

где  $\psi$  – угол дифферента,  $\omega_z$  – угловая скорость дифферента,  $m_u$  - управляющий момент,  $m(t)$  -

возмущающий момент (волнение).

В этом случае функцию Ляпунова можно представить в виде:

$$V(\psi, \omega_z) = \frac{m\omega_z^2}{2} + \int f(\psi)d\psi$$

$$\dot{V} = m\omega_z \dot{\omega}_z + f(\psi)\omega_z = -b\omega_z^2 < 0$$

В случае, если нелинейность  $f(\psi)$  может быть аппроксимирована следующим образом:  $f(\psi) = k_1(\psi - \psi_0) + k_2(\psi - \psi_0)^2$ , функция Ляпунова будет иметь вид (после нормирования на массу):

$$V(\psi, \omega_z) = \frac{\omega_z^2}{2} + \frac{k_1(\psi - \psi_0)^2}{2} + \frac{k_2(\psi - \psi_0)^3}{3}$$

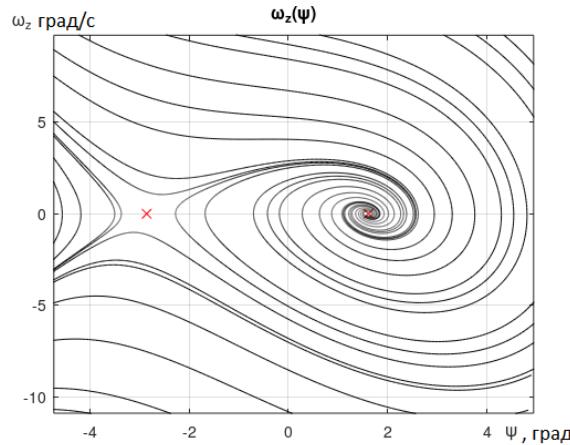


Рис. 3. Фазовый портрет уравнения килевой качки МПО на ВП амфибийного типа

Фазовый портрет уравнения килевой качки МПО на ВП амфибийного типа и линии уровня функции Ляпунова приведены на рис. 3 и 4. Параметры модели:  $a_1 = b/m = 0.865$ , коэффициенты нелинейности  $\psi_0 = 1.3^\circ$ ,  $k_1 = 2.75$ ,  $k_2 = 41$ .

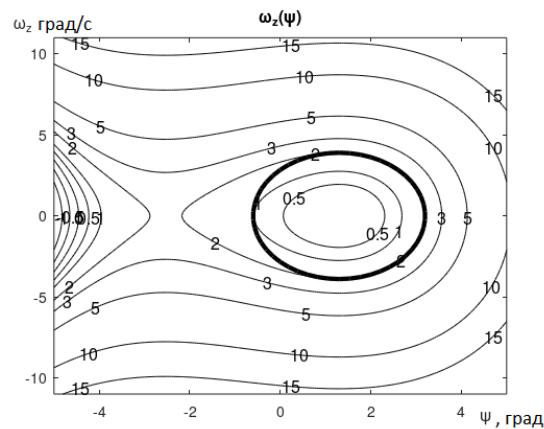


Рис. 4. Линии уровня функции Ляпунова и аппроксимирующий эллипс

Как видно из рис.4, область притяжения балансировочного режима может быть аппроксимирована эллипсом. Центр эллипса располагается в точке  $(\psi = \psi_0, \omega_z = 0)$ , полуоси для рассмотренного примера составляют 1.5 градуса по крену и 1.3 градуса в секунду по угловой скорости. Область, ограниченная аппроксимирующим эллипсом, может быть использована в качестве

оценки области безопасного движения.

Рассмотрим вторую часть алгоритмов СПАВ – задачу возврата МПО в область безопасного движения, то есть противоаварийный алгоритм.

### Противоаварийный регулятор и условие срабатывания

С целью обеспечения минимального времени нахождения МПО вне области безопасного движения синтез закона возвращения МПО в область безопасного движения будем проводить на основе критерия минимального времени, т.е. рассмотрим задачу синтеза оптимального по быстродействию закона управления с целевой областью в виде области притяжения.

Особенностью задачи синтеза противоаварийного регулятора оптимального по быстродействию является то, что объект управления является нелинейным, а задача управления как следствие, это принципиально нелинейная задача с ограничениями в виде области безопасного движения, где в качестве области безопасного движения используется область  $G$  - область притяжения.

Основная идея синтеза регулятора обеспечения безаварийного движения МПО заключается в том, чтобы:

оценить область притяжения  $G$  областью  $G_0$  так, чтобы  $G \supset G_0$ ;

- задать вложенные области  $G_1$  и  $G_2$ :

$G \supset G_0 \supset G_1 \supset G_2$ , где  $G_1$  - область, при выходе за которую включается противоаварийный регулятор и область  $G_2$  – область, и при возврате в которую выключается противоаварийный регулятор.

При реализации такой стратегии управления и правильном выборе областей, объект останется в области  $G_0$  и, следовательно, авария движения будет предотвращена. Области  $G_0$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G$ , показаны на рис. 5.

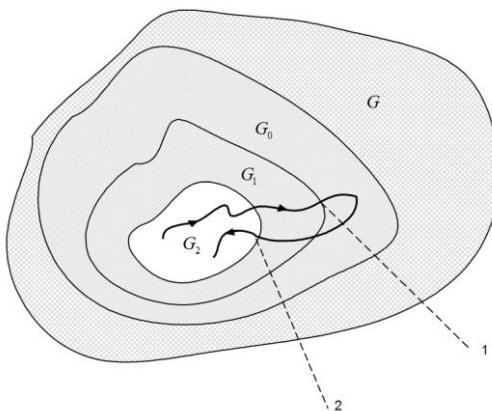


Рис. 5. Области безопасного движения, включения и выключения противоаварийного регулятора:  
1 – момент включения противоаварийного регулятора; 2 - момент выключения противоаварийного регулятора

Целесообразно использовать отличающиеся между собой области  $G_2$  и  $G_1$ , чтобы не происходило постоянных срабатываний противоаварийного регулятора при нахождении изображающей точки вблизи границы, чтобы противоаварийный регулятор не входил в колебательный режим работы.

Рассмотрим разработку закона предотвращения

аварий, действующих на средства управления, с целью оптимального по быстродействию возвращения вектора состояния в целевое множество  $G_2$ .

Пусть движение МПО описывается математической моделью вида:

$$\dot{x} = F(x(t), u(t), f(t)), \quad (4)$$

где  $x(t)$  - вектор состояния,  $u(t)$  - управление,  $f(t)$  - возмущение.

Основной особенностью функционирования системы с ограничением в виде области устойчивости на вектор состояния  $x(t)$  является то, что она начинает функционировать лишь с момента выхода вектора состояния объекта на границу области  $G_1$ , входящую в область устойчивости  $G$  (границу  $G_1$  обозначим за  $\Gamma_{G_1}$ ), что в техническом плане эквивалентно возникновению аварийной ситуации МПО, которая при отсутствии противоаварийного управления может перерасти в аварию.

Вследствие этого, начиная с данного момента, СПАВ формирует управляющее воздействие, возвращающее вектор состояния за минимальное время в целевое множество  $G_2$  (область безопасности) с границей  $\Gamma_{G_2}$ , а именно в область притяжения МПО. После этого система предотвращения аварий прекращает функционирование, происходит стабилизация объекта управления, т.е. дальнейшее движение изображающей точки в фазовом пространстве к исходной точке равновесия, которое осуществляется за счет восстанавливающих свойств МПО или МПО совместно с системой стабилизацией.

При синтезе закона предотвращения аварий для объекта, описываемого дифференциальными уравнениями, потребуем обеспечить минимальное значение критерия:

$$J(u) = \int_0^T 1 dt$$

при возвращении вектора состояния из любой точки за пределами  $G_2$  ( $x \in \bar{G}_2$ , где  $\bar{G}_2 = R^n - G_2$ ) в целевое множество  $G_2$ . Возвращение объекта в область устойчивости, выведенного аварийными воздействиями в область  $\bar{G}_2$ , происходит под воздействием управления  $u(t)$ , которое из физических соображений ограничено кусочно-непрерывным управлением с ограниченными компонентами, т.е.  $u(t) \in U$ , где  $U$  – непустое ограничивающее множество в  $R^n$ . Такое управление является допустимым управлением. Задачей построения системы является определение  $u(t)$ , обеспечивающего минимальное значение критерия.

Для решения задачи оптимального по быстродействию управления  $u(t)$  нелинейной автономной системой в случае подвижного правого и свободного левого конца будем использовать принцип максимума Понтрягина, который вместе с условиями трансверсальности дает необходимые условия, которым должно удовлетворять оптимальное управление. Дополним систему уравнением вида:

$$\dot{x}_0 = F_0(x(t), u(t), f(t)) = 1$$

и введем вектор расширенного состояния  $\tilde{x} = [x_0, x]^T$ , и, следовательно, правых частей  $\tilde{F} = [F_0, F]^T$ .

Тогда векторное уравнение состояния

запишется в виде:

$$\dot{x} = \tilde{F}(\tilde{x}(t), u(t), f(t))$$

Далее для того, чтобы применить технику принципа максимума Понtryгина, вводятся вспомогательные (сопряженные) переменные  $\lambda_i(t)$  и записывается гамильтониан  $H$ :  $H = \sum \lambda_i F_i(x, u, t)$

Необходимое условие оптимальности управления  $u(t)$  имеет вид:

$$u = \arg \max H(\lambda, x, u)$$

из которого находится  $u$  как функция  $x$ . Некоторые полезные случаи решения задачи оптимального быстродействия приведены в [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Для такого вида функционала известно, что управление может быть представлено в виде

$$u(t) = u_{\max} \operatorname{sign} \left\{ \frac{\partial F}{\partial u} \Big|_{u=u^*} \lambda^* \right\} = u_{\max} \operatorname{sign} D(x),$$

где  $D(x)$  некоторая функция, которая определяет моменты времени, когда управление переключается, ее принято называть функцией переключений.

В работе [10] приведено решение задачи о максимальном быстродействии для нелинейной системы -го порядка, линейной по управлению:

$$\dot{x} = F(x(t)) + bu(t) \quad (5)$$

Для задач управления судном такой алгоритм является наиболее полезным, поскольку большинство объектов можно считать линейными по управляющему воздействию (например, угол перекладки руля или по заданной тяге двигателя – здесь следует сказать, что даже если реальное управление проводится при помощи например частоты вращения, а тяга двигателей пропорциональна квадрату частоты, то можно считать воздействием квадрат частоты (безразмерную заданную тягу) и полагать систему линейной по управлению). Например, система (3) является линейной по управляющему моменту  $m_u$  и соответственно тоже является системой вида (3).

Для систем вида (5) можно применять процедуру нахождения управления [10], где для такого вида модели дана замкнутая процедура нахождения нулей функции переключений (оптимизационная процедура с решением задачи Коши), и доказано, что для такой задачи функция переключений имеет на интервале  $(0, T)$  не более  $n - 1$  моментов переключения.

В том случае, если функция  $D(x)$  по отношению к  $x(t)$  является знакопостоянной, то можно говорить о том, что движение по экстремали системы (2) при  $t \rightarrow \infty$  возможно только при постоянных значениях управляющего сигнала, определяемого знаком функции  $D(x)$ .

В случаях, когда  $D(x)$  является знакопеременной функцией  $x(t)$ , можно говорить о существовании некоторых подмножеств  $\Gamma_{G+} \subset \Gamma_G$  и  $\Gamma_{G-} \subset \Gamma_G$ , движение к которым происходит по экстремалиам системы, определенным соответственно положительным и отрицательным значением  $u = \pm u_{\max}$  управляющего сигнала.

### Пример противоаварийного регулятора

Рассмотрим пример противоаварийного регулятора для системы вида (3).

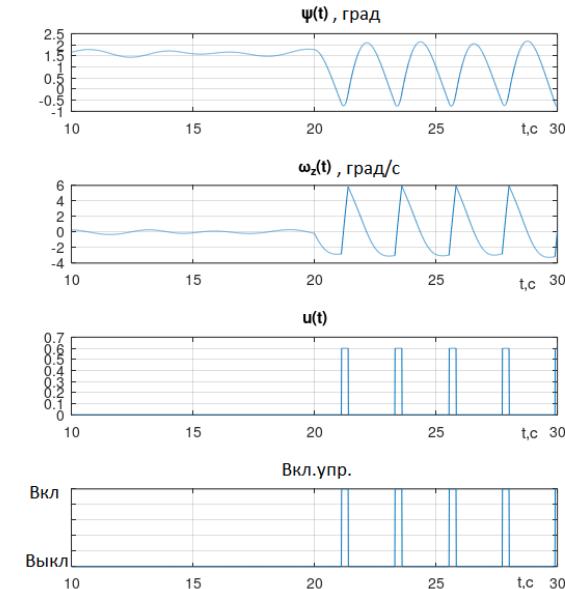


Рис. 6. Отказ. Срабатывание противоаварийного релейного регулятора

Судно движется на небольшом волнении. На 20 секунде происходит авария движения – появляется дополнительный отрицательный (на нос) постоянный момент. Противоаварийный регулятор срабатывает как показано на рис.6, так как проблема не устранена, то срабатывания регулятора периодические.

Альтернативой релейному регулятору (который достаточно жестко реагирует на отказ) может быть ПИД-регулятор, приводящий судно в балансировочную точку, срабатывающий по той же схеме рис.5. Такой регулятор (также с ограничением на управление, поэтому при больших коэффициентах на управление регуляторы близки) может быть предпочтительнее – рис.7, релейный регулятор более жестко «отбрасывает» объект от края допустимой области и ввиду колебательности объекта привести к дополнительной раскачке.

В случае таких быстрых процессов нужно учитывать динамику приводов средств управления, которые могут вносить существенные корректизы в работу алгоритма.

Так, на рис.8 показана работа релейного алгоритма с учетом динамики привода, видно, что в такой ситуации алгоритм может не справиться и требуется настройка параметров, например, более раннее его включение.

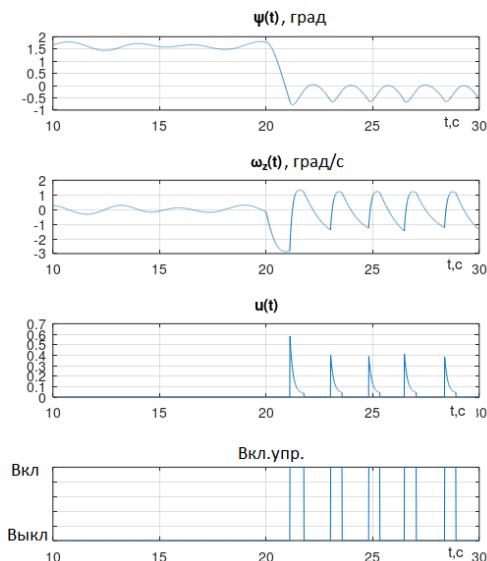


Рис. 7. Отказ. Срабатывание противоаварийного ПИД-регулятора

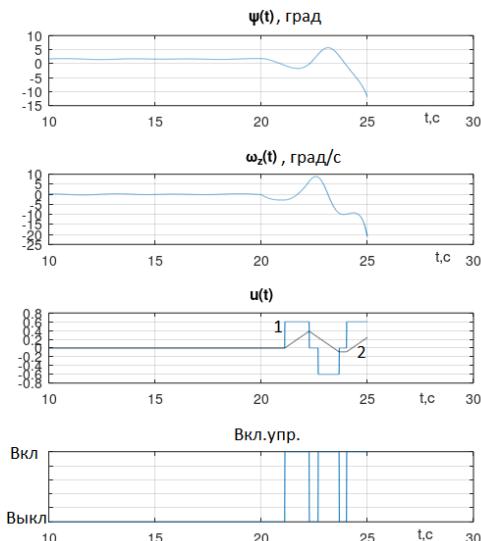


Рис. 8. Отказ. Неудачное срабатывание противоаварийного релейного регулятора (с учетом динамики привода, 1 – заданное значение управляющего воздействия, 2 – текущее значение с учетом динамики привода)

Следует отметить, что алгоритмы не могут вернуть МПО в область безопасного движения, если в результате отказов существенно теряется, например, эффективность средств управления.

### Заключение

В работе рассмотрен подход к построению СПАВ как подсистемы системы управления движением скоростного МПО, основанный на удержании МПО в области безопасного движения. Области предложено оценивать на основе функций Ляпунова и упрощенных нелинейных математических моделей объекта. Подход проиллюстрирован на примере кильевой качки СВП – системы с квадратичной нелинейностью, для которой оценка области безопасного движения получена в виде эллипса с центром в точке в точке ( $\psi = \psi_0, \omega_z = 0$ ). Возврат в область безопасного движения может быть осуществлен, например, по критерию максимального быстродействия, который существенно упрощается даже для систем порядка выше второго, но линейных по управлению. Приведен пример противоаварийного регулятора на примере кильевой качки СВП. На примере показано, что более мягкие ПИД-регуляторы с ограничениями также могут быть использованы при включении по предложенной схеме. На примере показано, как динамика привода может вносить корректиды в работу противоаварийного алгоритма. Предложенный подход может быть использован для построения алгоритмов предотвращения аварий движения скоростных МПО.

### Литература

1. Ikeda, Y. & Katayama, Toru. (2000). Stability of high speed craft. 10.1016/B978-008043652-4/50031-6.
2. High Speed Marine Vehicles Committee.Final Report and Recommendations to the 21nd ITTC. ITTC, 1996, pp 515-560.
3. В.М. Амбросовский, Ю.А. Лукомский Управление движением судна с динамическими принципами поддержания в аварийных ситуациях // Известия ЛЭТИ. - Л.- 1989. - вып.410 - с.22-25.
4. В.Ю. Воскобович, Ю.А. Лукомский., С.П. Хабаров Об определении областей устойчивости установившихся движений нелинейной динамической системы в пространстве состояний // Известия ЛЭТИ. Научн. тр./ Ленинградский электротехнический институт им.В.И.Ульянова (Ленина).-1976- вып.206.
5. В.Ю. Воскобович, Ю.А. Лукомский., С.П. Хабаров. Об определении областей притяжения нелинейных динамических систем. // Изв. ЛЭТИ. Научн. тр./ Ленинградский электротехнический институт им.В.И.Ульянова (Ленина).-1977- вып.227.
6. Амбросовский В.М. Система предупреждения аварий движения морских подвижных объектов. Морская радиоэлектроника, №3(45), С.-Пб, 2013, с.46-49.
7. Амбросовский В.М., Амбросовский Ю.В., Харченко К.А. Система управления движением пассажирских судов на воздушной подушке. Современные технологии автоматизации, N3, 2017 г., с.22-26.

8. Л.С. Понtryгин, В.Г. Болтнянский, Р.В. Гамкелидзе, Е.Ф. Мищенко. Математическая теория оптимальных процессов // М.:Наука, 1969
9. Поляк Б.Т. Хлебников М.В., Рапорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления: учебное пособие // М.: ЛЕНАНД, 2019. — 500 с.: ил.
10. Хайлор Е.Н. О нахождении моментов переключения экстремального управления в нелинейной задаче быстродействия // Дифференц. уравнения, 1992, том 28, номер 11, 1988–1993.

#### References

1. Ikeda, Y. & Katayama, Toru. (2000). Stability of high speed craft. 10.1016/B978-008043652-4/50031-6.
2. High Speed Marine Vehicles Committee.Final Report and Recommendations to the 21nd ITTC. ITTC, 1996, pp 515-560.
3. Ambrosovsky V.M., Lukomsky Yu.A. Upravlenie dvizheniem sudna s dinamicheskimi principami podderzhaniya v avariynyh situaciyah [Vessel motion control with dynamic principles of maintenance in emergency situations]// Izvestia LETI. - L.- 1989. - issue 410 - p.22-25.
4. V.Y. Voskobovich, Yu.A. Lukomsky., S.P. Khabarov. Ob opredelenii oblasti ustojchivosti ustanovivshihся dvizhenij nelinejnoj dinamicheskoy sistemy v prostranstve sostoyanij [On determining the stability region of steady-state motions of a nonlinear dynamical system in the state space]// Izvestia LETI, L.-1976 - issue 206.
5. Voskobovich, Yu.A. Lukomsky., S.P. Khabarov. Ob opredelenii oblastej prityazheniya nelinejnyh dinamicheskikh sistem [On determining the areas of attraction of nonlinear dynamical systems] // Izvestia LETI, L.- 1977- issue 227.
6. Ambrosovsky V.M. Sistema preduprezhdeniya avariij dvizheniya morskikh podvzhnyh ob'ektov [System of prevention of accidents of movement of marine mobile objects]. Morskaya radioelektronika, No.3(45), S.-Pb, 2013, pp.46-49.
7. Ambrosovsky V.M., Ambrosovsky Yu.V., Kharchenko K.A. Sistema upravleniya dvizheniem passazhirskih sudov na vozdushnoj podushke [Motion control system of passenger hovercraft] Sovremennye tekhnologii avtomatizacii, N3, 2017, pp.4.
8. L.S. Pontryagin, V.G. Boltyansky, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mishchenko. Matematicheskaya teoriya optimal'nyh processov [Mathematical theory of optimal processes].- M.:Nauka, 1969.
9. Polyak B.T., Khlebnikov M.V., Rapoport L.B. Matematicheskaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Mathematical theory of automatic control: textbook] - M.: LENAND, 2019. - 500 p.: ill.
10. Khaylov E.N., O nahozhdennii momentov pereklyucheniya ekstremal'nogo upravleniya v nelinejnoj zadache bystrodejstviya [On finding the switching moments of extreme control in a nonlinear problem of speed], Differenc. uravneniya, 1992, Volume 28, number 11, 1988–1993.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Виктор Михайлович Амбросовский**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры корабельных систем управления, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф.Попова, 5Ф, e-mail: v-ambr@mail.ru

**Viktor M. Ambrosovsky**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ship Control Systems, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", ), 5, Professora Popova , St. Petersburg, 197022, Russian Federation, e-mail: v-ambr@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2022.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 06.05.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

**Научная статья**

УДК 629.123

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.017>

## Использование решения задачи “машины Дубинса” для исключения ситуации опасного сближения двух судов

А.С. Коренев<sup>1</sup> [alexey.korenev@sitronics-kt.ru](mailto:alexey.korenev@sitronics-kt.ru) С.П. Хабаров<sup>2</sup> e-mail: [serg.habarov@mail.ru](mailto:serg.habarov@mail.ru)

А.Г. Шпекторов<sup>3</sup> e-mail: [agshpectorov@etu.ru](mailto:agshpectorov@etu.ru)

<sup>1</sup>Ситроникс КТ, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

**Аннотация.** В статье предлагается подход к решению задачи предотвращения опасного сближения двух судов, путем изменения курса одного из них. С этой целью на первом этапе, предполагая, что суда двигаются прямолинейно и с постоянной скоростью, определяются координаты точки, в которой прогнозируется минимально допустимое безопасное сближение судов. На втором этапе, на базе задачи “машины Дубинса”, с учетом ограничений на управляемость по угловой скорости, рассчитывается траектория перехода судна в точку безопасного сближения, при условии, что второе судно не меняет параметров своего движения. Полученная криволинейная траектория и определенная на первом этапе линейная траектория могут существенно отличаться временем перехода, что может привести к опасному сближению. Ввиду этого, на третьем этапе предлагается алгоритм коррекции траектории движения судна на основе поиска новой точки сближения. Новая точка выбирается таким образом, чтобы, с учетом траектории кривой Дубинса, минимальное расчетное время маневра исключало возможность опасного сближения с другим судном.

**Ключевые слова:** Безэкипажное судовождение, управление траекторией, планирование маршрута, расхождение судов, машина Дубинса

**Для цитирования:** Коренев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Использование алгоритма “машины Дубинса” для исключения ситуации опасного сближения двух судов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 127—135.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.017>

## Application of the Dubins path problem to avoid the dangerously close approach of two vessels

Alexei S. Korenev<sup>1</sup> [alexey.korenev@sitronics-kt.ru](mailto:alexey.korenev@sitronics-kt.ru), Sergei P. Khabarov<sup>2</sup> [serg.habarov@mail.ru](mailto:serg.habarov@mail.ru),

Andrei G. Shpекторов<sup>3</sup> [agshpectorov@etu.ru](mailto:agshpectorov@etu.ru)

<sup>1</sup>Sitroniks KT, Saint-Petersburg, Russian Federation, <sup>2</sup>St. Petersburg state forest technical university, Russian

Federation <sup>3</sup>St. Petersburg electrotechnical university “LETI”, Russian Federation

**Abstract.** An approach to solve a problem of vessel's collision avoidance is proposed. The preventing of the dangerously close approach of two ships is provided by specific course changing of one of them. At the first stage the coordinates of minimal acceptable approach distance waypoint are calculated with condition of the straight leg and constant speed vessel's motion. At the second stage, the trajectory to the minimal acceptable approach distance waypoint is calculated on the basis of the Dubins path problem. In this case the angular velocity limitation is included, with assume that the second ship saves its motion parameters. The straight line, which obtained at the first stage, and the Dubins curve may differ significantly on the time of destination safe waypoint. That may lead to dangerous approach to the second ship. Thus, at the third stage an algorithm is proposed to correct the vessel trajectory by searching for a new waypoint of approach. The new point is chosen to provide minimal maneuvering time with avoiding the dangerous approach.

**Keywords:** Unmanned navigation, track control, route planning, collision avoidance, Dubins system

**For citation:** Alexei S. Korenev, Sergei P. Khabarov, Andrei G. Shpекторов. Application of the Dubins path problem to avoid the dangerously close approach of two vessels. 2022. 2022. № 2 part 1. P. 127—135.

### Введение

Предупреждение столкновений судов является одной из самых важных и сложных задач современного судовождения. Несмотря на высокий уровень автоматизации судов, операции маневрирования при расхождении выполняются, как правило, вручную (либо путем ручного ввода командных поправок к курсу или траектории в системы автоматизированного управления). Операторы при расхождении руководствуются

Международными правилами предупреждения столкновений судов на море 1972 года.

В современных условиях развития безэкипажного судовождения задача автоматизации предупреждения столкновений становится еще более актуальной по ряду причин. Дистанционное управление судном с удаленного берегового центра не является достаточно надежным ввиду возможной потери связи или задержек, возникающих в информационных и управляющих каналах. К тому же в принятой в настоящее время практике безэкипажного судовождения основные функции

управления на себя принимает автономная навигационная система (АНС) [1,2,3], схожая по функционалу с электронно-картографическими навигационно-информационными системами. Именно АНС формирует траекторию движения судна, командные поправки для систем управления курсом и скоростью, исходя из окружающей навигационной обстановки и команд берегового центра. Таким образом, задача автоматического предупреждения столкновения с другими судами в том или ином объеме должна быть возложена на АНС. Следует отметить, что строгая алгоритмизация правил МППСС-72 представляет собой исключительно сложную задачу для случаев, когда в процессе расхождения участвуют более двух судов, либо район движения ограничен, имеет препятствия или зоны недопустимого движения.

Одним из подходов к решению подобной задачи автоматизации может являться оптимизация сложной целевой функции, формулирующей степень опасности некоего заданного маневра. Для этого надо разработать специальное алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее оперативно оценивать уровень опасности в зависимости от взаимного расположения и движения судов, дистанции между ними, особенностей динамики и других параметров. Данная статья посвящена разработке математического аппарата, на основе которого можно составлять и реализовывать алгоритмы оценки опасности маневров и выбирать безопасные маршруты движения.

В качестве критерия опасности столкновения резонно выбрать дистанцию относительного сближения судов. С учетом действующих ветроволновых возмущений и погрешностей источников навигационной информации следует выбрать некоторое пороговое значение минимальной дистанции, достижение или пересечение которой будет предполагать потенциально опасную ситуацию. Необходимо разработать возможность контроля дистанции относительного сближения при произвольном изменении направления движения судна. Подобная задача, по сути, является геометрической.

Однако важно учитывать, что судно представляет собой динамический объект с ограниченным управлением, изменение направления движения происходит инерционно, и траектория движения при этом переходе также может быть потенциально опасной. Математический аппарат для формирования подобных траекторий с учетом ограничений управления может быть сформулирован в терминах задачи Дубинса, и уже исследован авторами в ряде статей [4,5].

#### Постановка задачи.

Основным принципом управления процессом расхождения судов при их опасном сближении является локально-независимое управление, при котором каждое из судов контролирует текущую ситуацию сближения. Для функционирования таких систем требуется выполнить выбор наиболее эффективных способов расхождения судна с целью изменения курса или скорости. В работах [6,7] описаны разные алгоритмы решения данной задачи,

но общим для них является то, что процесс принятия решения содержит следующие основные этапы:

- анализ окружающей обстановки, включая оценку относительной позиции и параметров относительного движения;
- выявление возникновения ситуации опасного сближения судов;
- выбор стратегии расхождения в зависимости от степени опасности возникающей ситуации.

В данной статье на базе аналогичной стратегии предлагается алгоритм расхождения двух судов, отличительной особенностью которого является формирование оптимальной по времени траектории движения судна в точку безопасной встречи со сближающимся судном. При этом, считается, что объекты перемещаются в горизонтальной плоскости, имеют ограничения на угловые скорости поворота, и их движение на плоскости X0Y описывается системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned} x'(t) &= V_x = V(t) \sin \varphi(t) \\ y'(t) &= V_y = V(t) \cos \varphi(t) \\ \varphi'(t) &= u(t) \\ u(t) &\in [-U_{\max}, +U_{\max}] \\ x(t_0) &= x_0, y(t_0) = y_0, \varphi(t_0) = \varphi_0, V(t_0) = V_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x(t)$ ,  $y(t)$  – координаты центра тяжести судна в неподвижной системе координат,  $\varphi(t)$  – угол курса,  $V(t)$  – линейная скорость движения судна,  $u(t)$  – скалярный сигнал управления, пропорциональный угловой скорости поворота.

#### Выявление ситуации опасного сближения

Имея два объекта (судно А и судно В), движение которых описывается системой дифференциальных уравнений (1), на начальном этапе решения задачи предположим, что оба они движутся прямолинейно с постоянными скоростями и курсами (рис.1):

$$\begin{aligned} u_a(t) &= u_b(t) = 0; \\ V_a(t) &= V_a \text{ и } V_b(t) = V_b; \\ \varphi_a(t) &= \varphi_a \text{ и } \varphi_b(t) = \varphi_b. \end{aligned}$$

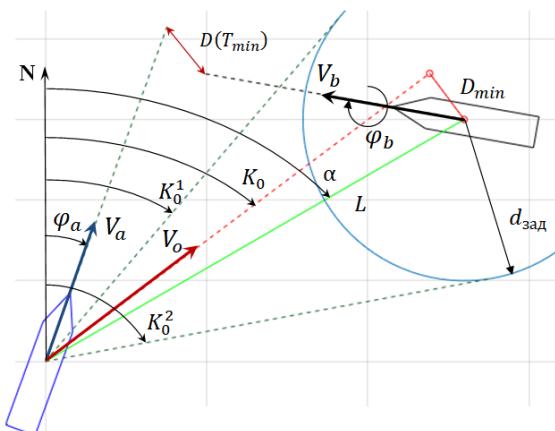


Рис.1. Режим сближение двух судов, двигающихся с постоянными скоростями и курсовыми углами.

Тогда проекции взаимного перемещения судов могут быть представлены в виде:

$$\Delta x(t) = x_b(t) - x_a(t) = (x_{bo} + V_{bx}t) - (x_{ao} + V_{ax}t)$$

$$\Delta y(t) = y_b(t) - y_a(t) = (y_{bo} + V_{by}t) - (y_{ao} + V_{ay}t)$$

После упрощения получим:

$$\Delta x(t) = \Delta x_o - V_{ox}t$$

$$\Delta y(t) = \Delta y_o - V_{oy}t$$

где  $V_{ox} = V_a \sin \varphi_a - V_b \sin \varphi_b$ ,  $V_{oy} = V_a \cos \varphi_a - V_b \cos \varphi_b$  представляют собой проекции на оси X и Y вектора относительной скорости движения судна A по направлению к судну B.

Изменение во времени расстояния между двумя судами может быть получено из выражения:

$$D(t) = \sqrt{\Delta x(t)^2 + \Delta y(t)^2} \quad (2)$$

Взяв от этого выражения производную по времени:

$$D' = \frac{(\Delta x_o - V_{ox}t)V_{ox} + (\Delta y_o - V_{oy}t)V_{oy}}{-D}$$

и приравняв ее нулю, можно определить момент времени, когда расстояние между сближающимися судами будет минимальным:

$$T_{min} = \frac{\Delta x_o V_{ox} + \Delta y_o V_{oy}}{V_o^2}, \quad (3)$$

здесь  $V_o = \sqrt{V_{ox}^2 + V_{oy}^2}$  – абсолютное значение вектора относительной скорости движения судна A, двигающегося по направления к судну B с относительным курсовым углом:

$$K_o = \text{atan2}(V_{ox} / V_{oy})$$

На основе (3) можно сделать вывод, что при исходных данных, удовлетворяющих условию  $T_{min} < 0$ , не будет не только опасного сближения, но и вообще отсутствует сближение. Поэтому для этой конкретной пары судов возможен выход из дальнейшей реализации алгоритмов расхождения.

Однако возможна и иная трактовка полученного условия. Если допустить, что известны начальная дистанция между судами ( $L$ ), а также пеленг ( $\alpha$ ) с судна A на судно B, то из рис. 1 следует:

$$\Delta x_o = L \sin \alpha, \quad \Delta y_o = L \cos \alpha,$$

что позволяет выражение для  $T_{min}$  записать в виде:

$$T_{min} = \frac{L \sin(\alpha) V_{ox}}{V_o V_o} + \frac{L \cos(\alpha) V_{oy}}{V_o V_o},$$

или после простейших преобразований переписать в форме:

$$T_{min} = \frac{L}{V_o} (\sin(\alpha) \sin(K_o) + \cos(\alpha) \cos(K_o))$$

$$\text{или } T_{min} = \frac{L}{V_o} \cos(K_o - \alpha)$$

Сближение двух судов будет наблюдаться при значениях  $T_{min} > 0$ , то есть когда  $\cos(K_o - \alpha) > 0$ . Это может быть только при изменении значений  $\cos(K_o - \alpha)$  в диапазоне:

$$2\pi - \pi/2 \leq (K_o - \alpha) \leq \pi/2$$

Ситуация опасного сближения будет наблюдаваться в тех случаях, когда  $D(T_{min}) \leq d_{зад}$ . Для проверки условия возникновения такой ситуации необходимо, прежде всего, найти выражение для вычисления  $D(T_{min})$ . Из (2) следует:

$$D_{min} = D(T_{min}) = \sqrt{(x_o - V_{ox}T_{min})^2 + (y_o - V_{oy}T_{min})^2}$$

а после подстановки в него значения для  $T_{min}$

$$D_{min} = L \sqrt{\left( \sin \alpha - \cos(K_o - \alpha) \frac{V_{ox}}{V_o} \right)^2 + \left( \cos \alpha - \cos(K_o - \alpha) \frac{V_{oy}}{V_o} \right)^2}$$

и выполнения простейших преобразований будет получено выражение для определения дистанции минимального сближения для конкретной пары судов на основе их исходных параметров движения:

$$D_{min} = \text{sign}(\sin(K_o - \alpha)) L \sin(K_o - \alpha) \quad (4)$$

При значениях  $D_{min}$ , превосходящих значения минимально допустимого расстояния для сближения двух судов  $d_{зад}$ , можно сделать вывод об отсутствии ситуации опасного сближения судов и выйти из алгоритма расхождения. В противном случае необходимо решить задачу по предупреждению ситуации опасного сближения.

#### Предупреждение опасного сближения путем изменения курса

В тех случаях, когда допустимо предположение о постоянстве скорости движения судов, одним из способов исключения ситуации опасного сближения может быть изменение курсового угла движения судна A с целью отклонения траектории его движения от исходной так, чтобы:

$$K_o^1 \geq K_o \geq K_o^2,$$

где  $K_o^1, K_o^2$  – минимально возможные относительные курсовые углы судна A при его отвороте влево или вправо от исходной траектории движения (рис. 1).

Эти значения являются границами области безопасного сближения судов и могут быть определены из выражения (4) для заданной минимально возможной дистанции между ними:

$$[K_o^1, K_o^2] = [\alpha - \arcsin(d_{зад} / L), \alpha + \arcsin(d_{зад} / L)]$$

Если принять во внимание, что

$$\operatorname{tg}(K_o^i) = \frac{V_{ox}^i}{V_{oy}^i} = \frac{V_a \sin \varphi_a^i - V_b \sin \varphi_b^i}{V_a \cos \varphi_a^i - V_b \cos \varphi_b^i},$$

то можно получить тригонометрическое уравнение:

$$\begin{aligned} (V_a \sin \varphi_a^i - V_b \sin \varphi_b^i) \cos(K_o^i) &= \\ &= (V_a \cos \varphi_a^i - V_b \cos \varphi_b^i) \sin(K_o^i), \end{aligned}$$

которое после упрощения и введения переменной  $m_v = V_b / V_a$  будет иметь вид:

$$\sin(\varphi_a^i - K_o^i) = m_v \sin(\varphi_b - K_o^i) \quad (5)$$

Решение этого уравнения позволяет определить значения  $\varphi_a^i$ , то есть значения истинных курсов движения судна A при отвороте влево ( $i=1$ ) или

вправо ( $i=2$ ). Изменения судном А исходного курса до значения  $\varphi_a^i$  исключит опасное сближение судов.

Следует отметить, что если при значениях скоростей  $V_a > V_b$  (когда  $m_v < 1$ ) решение данного уравнения существует всегда, то при значениях скоростей  $V_a \leq V_b$  (когда  $m_v \geq 1$ ) решение возможно только в том случае, когда

$$m_v \sin(\varphi_b - K_o^i) < 1 \quad (6)$$

При аналитическом решении уравнения (5) в диапазоне  $0^\circ \leq \varphi_a^i < 360^\circ$  могут быть получены два ( $i=1,2$ ) значения корня этого уравнения:

$$\varphi_a^i = \begin{cases} K_o^i + \arcsin(\gamma) \\ K_o^i + \pi - \arcsin(\gamma) \end{cases} \quad (7)$$

где  $\gamma = m_v \sin(\varphi_b - K_o^i)$

Однако подстановка значения второго корня в выражение (3) при  $V_a \leq V_b$  дает отрицательное значение времени, что противоречит физической реализуемости процесса, и позволяет в дальнейшем в качестве истинных значений курсов судна А для данного случая рассматривать только два значения:

$$\varphi_a^i = \begin{cases} \alpha - \arcsin(d_{\text{зад}} / L) + \arcsin(\gamma) \\ \alpha + \arcsin(d_{\text{зад}} / L) + \arcsin(\gamma) \end{cases}$$

для случая отворота судна А от исходного курса влево ( $i=1$ ) или вправо ( $i=2$ ).

Движение судна А с истинным курсом  $\varphi_a^i$  будет выполняться с относительной скоростью

$$V_o^i = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + 2V_a V_b \cos(\varphi_a^i - \varphi_b)},$$

обеспечивая при этом движение к точке минимально допустимого сближения двух судов в течение промежутка времени равного:

$$T_d^i = L \cos(K_o - \alpha) / V_o^i$$

Таким образом, судно А для недопущения ситуации опасного сближения с судном В должно при неизменной скорости движения изменить свой курс на новый, равный  $\varphi_a^i$ .

### Выбор стратегии расхождения

В исходной постановке предполагается, что суда из точек  $A_o = (x_{ao}, y_{ao}, \varphi_a, V_a)$  и  $B_o = (x_{bo}, y_{bo}, \varphi_b, V_b)$  не меняя скоростей и курсов, идут навстречу друг друга. Судно А, двигаясь в течение  $T_d^i$  курсом  $\varphi_a^i$ , попадет в точку  $A_d^i = (x_{ad}^i, y_{ad}^i, \varphi_a^i, V_a)$  с координатами

$$\begin{aligned} x_{ad}^i &= x_{ao} + T_d^i V_a \sin \varphi_a^i \\ y_{ad}^i &= y_{ao} + T_d^i V_a \cos \varphi_a^i \end{aligned}$$

За это время судно В переместится в точку  $B_d^i = (x_{bd}^i, y_{bd}^i, \varphi_b^i, V_b)$ , расстояние от которой до точки  $A_d^i$  будет равно  $d_{\text{зад}}$ .

Это позволяет исходную задачу предупреждения ситуации опасного сближения судов свести к задаче поиска минимальной по времени траектории

движения судна А из точки  $A_o$  в точку  $A_d^1$  или  $A_d^2$  в зависимости от принятой стратегии изменения курса, путем отворота влево или вправо.

Особенность решения этой задачи в том, что судно, движение которого на плоскости ХОY может быть описано системой (1), обладает ограниченной управляемостью по угловой скорости, которая определяется максимально допустимым радиусом циркуляции  $R_u$ :

$$u_a(t) \in [-V_a / R_u, +V_a / R_u]$$

В этой постановке данную задачу можно решить с использованием хорошо известной задачи "машины Дубинса" [8,9], которая гарантирует, что на плоскости ХОY минимальные по времени траектории движения объекта между двумя произвольными точками состоят из прямолинейных участков траекторий (S) и дуг окружностей, соответствующих повороту направо (R) и налево (L).

Оптимальными могут быть шесть стратегий управления: {RLR, LRL, LSL, LSR, RSL, RSR}. Но только одна из них определяет кратчайший путь между любыми двумя конфигурациями. При этом для оценки любой из "кривых Дубинса" требуется определить параметры двух промежуточных точек Р и Q, соответствующих моментам переключения управления.

Ограниченностю прямого использования данного подхода вызвана тем, что точки  $A_d^i$  вычислялись в предположении прямолинейности движения судна А и без учета ограничений на его управляемость по угловой скорости.

Вместе с тем данный подход может быть полезен при большом количестве конфигураций исходных состояний. Особенно в тех случаях, когда величина L значительно превосходит значения  $d_{\text{зад}}$  и  $R_u$ .

В частности, если судно А, находясь в точке начала координат, идет со скоростью  $V_a = 20$  узлов и с курсовым углом  $\varphi_a = 20^\circ$  навстречу судну В:

- которое находится на расстоянии  $L = 3$  мили от него с пеленгом  $\alpha = 50^\circ$ ;
- и которое идет со скоростью  $V_b = 15$  узлов с курсовым углом  $\varphi_b = -130^\circ$ ,

то через 304.96 секунд (или 5.06 минуты) дистанция их сближения будет составлять 1642.2 метра, что меньше заданной допустимой дистанции сближения, равной  $d_{\text{зад}} = 1$  миля.

Для построения кривой Дубинса, движение по которой может предотвратить опасное сближение этих судов, двигающихся навстречу друг с другом с относительной скоростью  $V_o = 33.83$  узла, надо вычислить относительные курсовые углы  $[K_o^1, K_o^2] = [30.529^\circ, 69.471^\circ]$ , а по ним и истинные курсовые углы  $[\varphi_a^1, \varphi_a^2] = [16.051^\circ, 83.949^\circ]$ .

Эти значения позволяют определить, что точка минимального сближения равная  $d_{\text{зад}}$  судном А будет достигнута через 303.89 секунды в точке с координатами  $[x_{ad}^1, y_{ad}^1] = [864.51 \text{м}, 3004.76 \text{м}]$  при

стратегии отворота на левый борт, и в точке с координатами  $[x_{ad}^2, y_{ad}^2] = [3109.23m, 329.61m]$  при стратегии отворота на правый борт.

На рис. 2 представлена рассчитанная траектория перехода судна из точки  $A_o$  в точку  $A_d^1$ , полученная при условии, что допустимый радиус циркуляции судна составляет  $R_u = 1000$  метров.

$$R_u = 1000\text{м}; [0.113; 16^\circ / 4.95; 16^\circ / 0; 16.1^\circ] - [5.06; 5.06] \text{мин.}$$

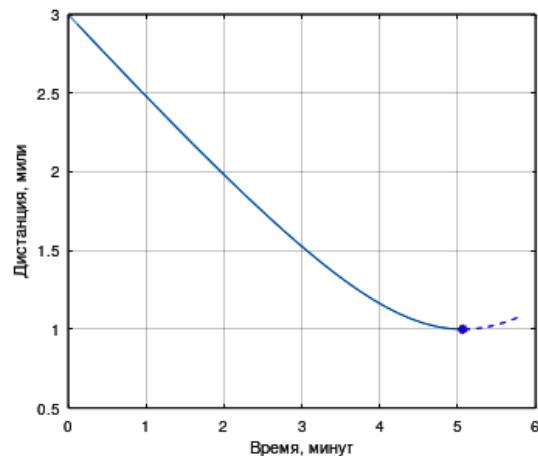
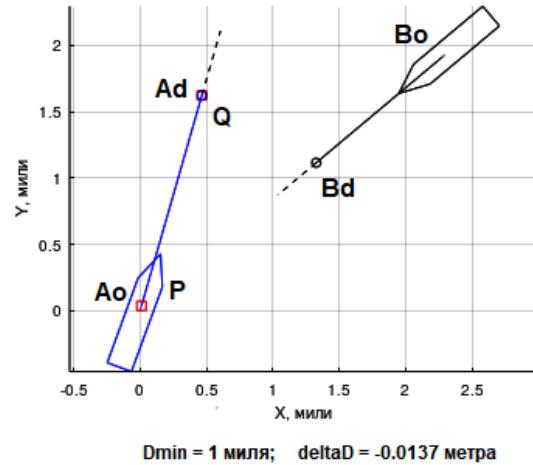


Рис.2. Траектория движения с отворотом влево по стратегии LSR.

Эта, оптимальная по времени кривая Дубинса, которая соответствует стратегии LSR, обеспечивает допустимую  $d_{зад}$  дистанцию сближения двух судов, реализуется за счет трех переключений управления в точках  $A_o$ ,  $P$  и  $Q$  (табл.1).

Таблица 1.

Координаты точек сопряжения фрагментов кривой Дубинса (LSR) при отвороте влево

$k$	Точка	$x_k, м$	$y_k, м$	$\varphi_k, ^\circ$	$T_k, сек$
0	$A_o$	0	0	20	6.77
1	$P$	21.54	66.27	16.007	297.04
2	$Q$	864.30	3004.01	16.007	0.00
4	$A_d^1$	864.51	3004.76	16.051	$\Sigma T_k = 303.82$

Что касается ситуации предотвращения опасного сближения двух судов за счет использования стратегии отворота судна А вправо, то и в этом случае кривая Дубинса, но по стратегии RSL, также является оптимальной по времени траекторией и позволяет абсолютно точно переместить судно из точки  $A_o$  в точку  $A_d^2$ . Однако при движении по рассчитанной кривой Дубинса будет получено, что

$$D(T_{min}) = 0.95 \text{ мили} < d_{зад}$$

$$R_u = 1000\text{м}; [2.26; 100^\circ / 2.82; 100^\circ / 0.455; 83.9^\circ] - [5.06; 5.54] \text{мин.}$$

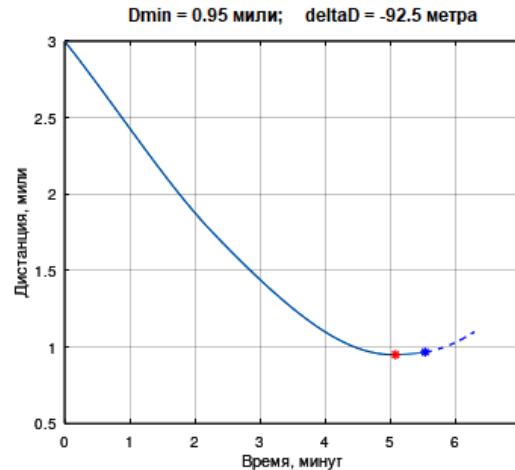
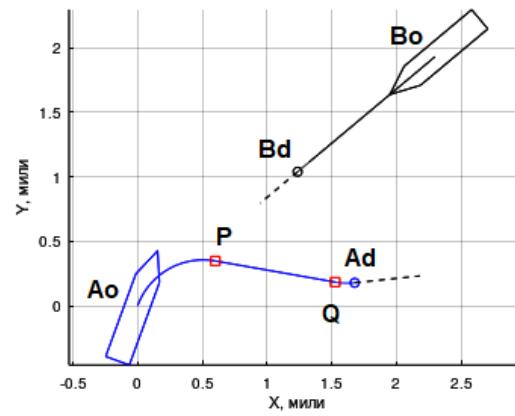


Рис.3. Траектория движения с отворотом вправо по стратегии RSL.

Откуда следует, что данная стратегия не может обеспечить заданную минимально допустимую дистанции сближения двух судов. Вызвано это тем, что точка  $A_d^2 = [3109.2m, 329.6m, 83.949^\circ, 15 \text{ узлов}]$  была вычислена в предположении о прямолинейном движении судна А в течении 5.06 минут.

При этом реальное движение судна А в точку  $A_d^2$  выполняется по кривой Дубинса, рассчитанной с учетом реальных ограничений на его управляемость по угловой скорости. Движение судна А из точки  $A_o$  в точку  $A_d^2$  будет занимать 5.54 минуты, что на 0.52 минуты превосходит расчетное время движения судна А по линейной траектории со скоростью  $V_a$ .

Одним из простейших вариантов решения данной проблемы может быть подход, при котором расчет траектории выполнялся бы для исходных значений

$d_{\text{зад}}^* > d_{\text{зад}}$  с контролем значение  $d_{\text{зад}}$  на всем пути движения по кривой Дубинса от точки  $A_0$  до  $A_d^2$ .

Но при этом надо иметь в виду, что это приведет к увеличению общего времени движения до точки, соответствующей моменту минимального сближения судов, то есть  $T_d^* > T_d^i$ .

В данной статье предлагается иной подход, суть которого заключается в оптимизации полученной траектории, за счет того, что расчет кривой Дубинса выполняется для перевода судна из исходной точки  $A_0$  не в точку  $A_d^2$ , а в некоторую новую точку  $G$ :

- которая достигается прямолинейным движением судна А со скоростью  $V_a^* < V_a$  за время  $T_d^*$ ;
- время перемещения в которую судна А по кривой Дубинса с исходной скоростью  $V_a$  составляет  $T_d^i$ ;
- а разница между значениями  $T_d^*$  и  $T_d^i$  должна быть минимальной и стремиться к нулю.

Применение данного подхода для варианта исходных данных, аналогичных предыдущему примеру, позволили найти оптимальное значение скорости прямолинейного движения судна А, которая стала меньше исходной и равнялась  $V_a^* = 18.06$  узла.

$$R_u = 1000 \text{ м; } [2.37; 104^\circ / 2.5; 104^\circ / 0.518; 85.5^\circ] - [5.06; 5.39] \text{ мин.}$$

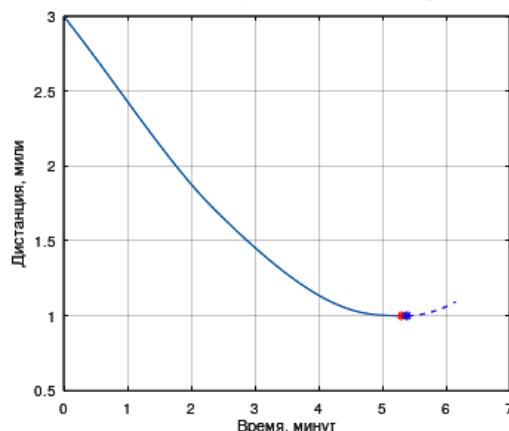
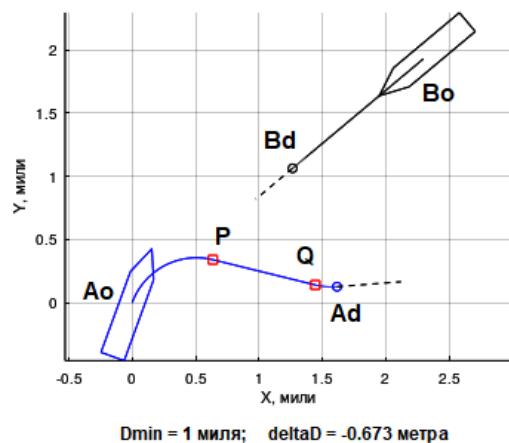


Рис.4. Оптимизированная траектория движения с отворотом вправо.

При движении с этой скоростью судно А с относительным курсовым углом  $K_O^{2*} = 69.50^\circ$  при абсолютном курсовом угле  $\varphi_a^{2*} = 85.50^\circ$  дойдет до точки G:  $[x_G^*, y_G^*] = [3109.23 \text{ м}, 329.61 \text{ м}]$  за время равное  $T_d^* = 5.39$  минуты. Именно эта точка будет использована в качестве конечной при расчете кривой Дубинса для движения судна А со скоростью  $V_a = 20$  узлов и  $R_u = 1000$  метров.

Вид траектории, обеспечивающей исключение опасного сближения судов путем отворота судна вправо, представлен на рис. 4. Она соответствует стратегии RSL, обеспечивает допустимую дистанцию сближения двух судов  $d_{\text{зад}}$  и реализуется, как и все кривые Дубинса, посредством трех переключений управляющих сигналов в точках  $A_0$ , P и Q (табл.2). На всех приведенных ранее графиках координаты точек переключения отмечены красными квадратами.

Таблица 2.  
Координаты точек сопряжения фрагментов кривой Дубинса (RSL) при отвороте вправо

$k$	Точк а	$xk, \text{м}$	$yk, \text{м}$	$\varphi k, {}^\circ$	$Tk, \text{сек}$
0	$A_0$	0	0	20	142.24
1	P	1179.1 0	1179.1 0	103.8 5	149.99
2	Q	2677.4 5	259.44	103.8 5	31.06
4	$A_d^2$	2994.5 6	233.38	85.50	$\Sigma Tk = 323.2$ 9

Таким образом, рассмотренный пример иллюстрирует возможность предложенного алгоритма использовать варианты недопущения опасного сближения судов, как за счет отворота влево, так и вправо. Кроме этого он показывает, что возможен учет ограничений на управляемость судна по угловой скорости, что достигается путем реализации построения траектории движения судна, как кривой Дубинса с использованием либо прямого или модифицированного подхода к решению задачи "машины Дубинса".

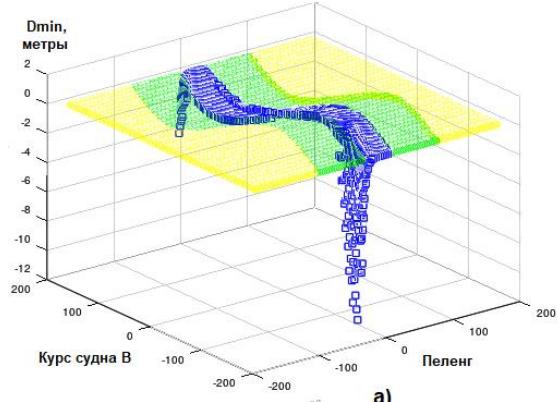
#### Анализ полученных результатов

Для оценки качества работоспособности алгоритма был промоделирован процесс исключения опасного сближения судов, изначально находящихся на расстоянии  $L = 3$  мили. Изменялись значения пеленга  $\alpha = [-180^\circ:2^\circ:180^\circ]$ , и для каждого из них – изменялись значения курса  $\varphi_b = [-180^\circ:2^\circ:180^\circ]$ .

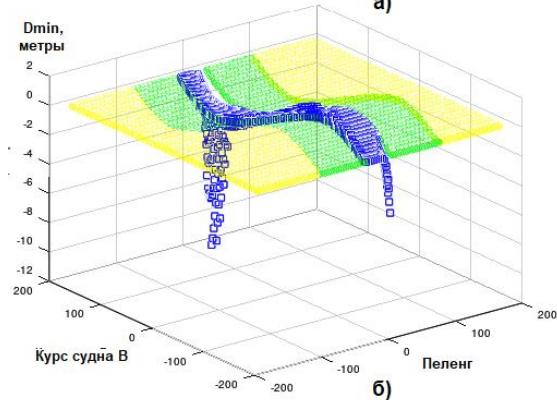
Моделирование работы алгоритма выполнено, как для стратегии отворота судна А влево, так и для стратегии отворота судна А вправо (рис. 5) показало, что максимальное отклонение от величины допустимого сближения судов  $d_{\text{зад}}$  составляет не более 12 метров, что менее 1% от  $d_{\text{зад}}$ . Причем эти отклонения наблюдались только при нескольких

сочетаниях состояний, а в подавляющем числе состояний отклонения от  $d_{зад}$  были близки к 0.

На этих рисунках, кроме отклонений от значения величины минимального сближения  $d_{зад}$  (синяя область), дополнительно выделены еще две области. Желтая область соответствует ситуациям, при которых сближения судов вообще не наблюдается, а зеленая соответствует ситуациям, когда суда сближаются, но их сближение происходит на расстояниях больших  $d_{зад}$ , и при этом алгоритм расхождения в работу не включается.



a)



б)

Рис.5. Значениями отклонений от  $d_{зад}$  при отвороте судна влево (а) и вправо (б).

Проведенное моделирование также показало, что при использовании предложенного алгоритма для значений скоростей  $V_a \leq V_b$  при решении уравнения (5) возникает необходимость проверки каждого из возможных ее решений (7).

Если, при  $V_a > V_b$  существует всегда только два решения, то при  $V_a \leq V_b$ , в зависимости от набора исходных данных, у системы (5) может быть, либо два, либо четыре решения

В частности, если суда идут со скоростями  $V_a=15$  и  $V_b=20$  узлов, то можно получить зависимость количества возможных решений системы (5) от сочетаний разных углов пеленга и курсовых углов судна В при заданном курсовом угле  $\varphi_a = 0^\circ$  (рис. 6).

На этом рисунке синяя область соответствует двум, а красная – четырем возможным решениям уравнения (5).

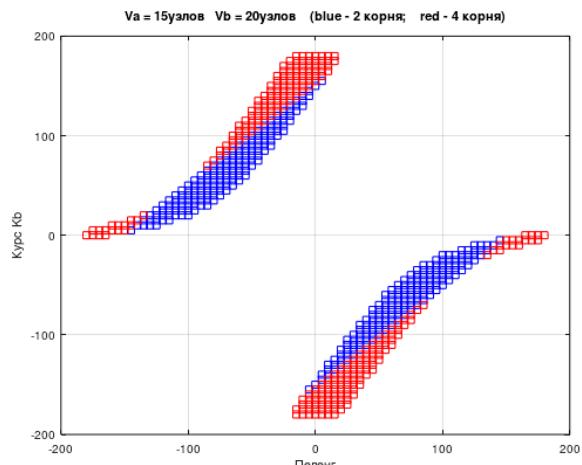


Рис.6. Количество решений уравнения (5) в случае ...  
 $V_a=15$  узлов и  $V_b=20$  узлов,

Это предполагает возможность построения соответствующего количества кривых Дубинса и их анализа с целью применимости для исключения ситуации опасного сближения. Как показали исследования, по крайней мере два решения давали приемлемые результаты.

### Заключение

Проведенное моделирование подтвердило работоспособность предложенного подхода к решению задачи предотвращения опасного сближения двух судов путем изменения курса одного из них. Основная суть алгоритма состоит в том, что на первом этапе в предположении, что суда движутся прямолинейно и с постоянной скоростью, определяются координаты точки, где обеспечивается минимально допустимое сближение судов.

На втором этапе, используя задачу "машины Дубинса" и учитывая ограничения на управляемость по угловой скорости, рассчитывается траектория перехода судна из произвольной исходной точки в точку безопасного сближения, при условии, что за это время второе судно не меняет параметров своего движения.

Полученная криволинейная траектория и определенная на первом этапе линейная траектория могут существенно отличаться временем перехода в точку безопасного сближения.

Ввиду этого, на третьем этапе предлагается оптимизировать траекторию движения судна путем поиска новой точки безопасного сближения, для которой движение по линейной траектории с некоторой пониженной скоростью будет занимать такое же время, как и движение по криволинейной траектории с исходной заданной скоростью.

## Литература

- Пинский, А. С. Автономное судовождение / А. С. Пинский // Морской вестник. – 2021. – № 2(78). – С. 101-105.
- Коренев, А. С. Автономное судовождение на действующих судах / А. С. Коренев, А. С. Скрыпка, С. П. Хабаров // Морской вестник. – 2022. – № 1(81). – С. 92-95.
- Коренев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование траекторий движения безэкипажного судна. // Морские интеллектуальные технологии. 2021, Т. 1. № 4 (54). С. 163-170.
- Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Геометрический подход к решению задачи для машин Дубинса при формировании программных траекторий движения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 653–663.
- Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Построение на базе задачи машины Дубинса опорных траекторий движения объектов с учетом постоянных внешних воздействий// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 1. С. 167–178.
- Безопасное расхождение судов в море. / Найденов Е.В., Дмитриев В.И. – М.: Моркнига, 2021 г. – 265 с.
- Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT, Academic Publishing, – Саарбрюккен (Германия), – 2016. – 585 с.
- Коренев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование маршрута движения судна в ограниченной акватории с учетом требования к изменению скорости хода, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. № 1 (55). С. 160—168.
- Вагизов М.Р., Хабаров С.П. Построение программных траекторий движения на базе решения задачи "Машина Дубинса". Информация и космос. 2021. №3. С. 116-125.

## References

- Pinskij, A. S. Avtonomnoe sudovozhdenie [Autonomous navigation], Morskoj vestnik, 2021, № 2(78), 101-105 s.
- Korenev, A. S. A. S. Skrypka, S. P. Habarov. Avtonomnoe sudovozhdenie na dejstvuyushchih sudah [Autonomous navigation on the operating vessels] , Morskoj vestnik, 2022, № 1(81),, 92-95 s.
- Korenev A.C., Habarov S.P., SHpektorov A.G. Formirovanie traektorij dvizheniya bezekipazhnogo sudna [A route calculation for unmanned vessel], Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2021, T. 1., № 4 (54), 163-170 s.
- Habarov S.P., SHilkina M.L. Geometricheskij podhod k resheniyu zadachi dlya mashin Dubinsa pri formirovaniyu programmnyh traektorij dvizheniya [Geometric approach to Dubins path problem for the motion program trajectories calculation]. Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki, 2021, T. 21, № 5, 653–663 s.
- Habarov S.P., SHilkina M.L. Postroenie na baze zadachi mashiny Dubinsa opornyh traektorij dvizheniya ob"ektov s uchetom postoyannyh vnesnih vozdejstvij [Construction of movement trajectories for object based on the Dubins car problem, taking into account constant external influences], Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki, 2022, T. 22, № 1, 167–178 s.
- Bezopasnoe raskhozhdenie sudov v more [Safe vessel's collision avoidance at sea], Najdenov E.V., Dmitriev, V.I., M., Morkniga, 2021,. – 265 s.
- Burmaka I.A. Upravlenie sudami v situacii opasnogo sblizheniya [Vessel's control at dangerous approach situation], I.A Burmaka., E.N Pyatakov., A.YU. Bulgakov, LAP LAMBERT, Academic Publishing, Saarbruckken (Germaniya), 2016, 585 s.
- Korenev A.S., Habarov S.P., SHpektorov A.G. Formirovanie marshruta dvizheniya sudna v ogranicennoj akvatorii s uchetom trebovaniya k izmeneniyu skorosti hoda, Morskie intellektual'nye tekhnologii [Ship's route planning in a limited area with speed changing requirement]., 2022, T. 1, № 1 (55), 160—168 s.
- Vagizov M.R., Habarov S.P. Postroenie programmnyh traektorij dvizheniya na baze resheniya zadachi "Mashina Dubinsa" [Construction of software trajectories of motion on the basis of the solution of the problem "Dubins Machine"]. Informaciya i kosmos. 2021. № 3. 116-125 s.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Алексей Сергеевич Коренев**, начальник отдела разработки систем автоматического управления движением, АО «Ситроникс КТ», 199178, Санкт-Петербург, Малый проспект В. О., 54 корп. 4, лит. П, e-mail alexey.korenev@sitronics-kt.ru

**Alexei S. Korenev**, head of department of automatic control system design, Sitronics KT JSC, Malyy Prospekt V.O., 54, building 5, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: alexey.korenev@sitronics-kt.ru

**Сергей Петрович Хабаров**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 194021, Санкт-Петербург, Институтский переулок д.5, e-mail: serg.habarov@mail.ru

**Sergei P. Khabarov**, Senior lecturer, Ph.D. (Eng), senior lecturer of the Department of information systems and technologies, Saint-Petersburg State Forest Technical University, Institutskii per. 5, 194021, St.Petersburg, Russian Federation, e-mail: serg.habarov@mail.ru

**Андрей Григорьевич Шпекторов**, кандидат технических наук, доцент кафедры корабельных систем управления, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, e-mail: agshpectorov@etu.ru

**Andrei G. Shpectorov**, Senior lecturer, Ph.D. (Eng), Senior lecturer of the Department of marine control systems, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: agshpectorov@etu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.05.2022.

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 656.61.052: 629.123: 504.423

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.018>

### Построение слоёв гидрометеорологических данных и их интерполяции методом бикубического сплайна

В.И. Филатов<sup>1</sup> Filatov\_viktor1994@mail.ru

<sup>1</sup>Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск

**Аннотация.** В статье приведены некоторые методы реализации послойного наложения погодной информации (ПНПИ) в современных электронно-карографических навигационно-информационных системах (ЭКНИС), а также рассмотрен метод уточнения и сглаживания полей гидрометеорологической обстановки (ГМО). Оперативные, статистические и прогнозические данные о ГМО поступают на судно в различных форматах, и их модели могут быть заданы скалярными или векторными полями. В статье приведены примеры построения моделей ГМО. Несмотря на большое количество гидрометеорологических и океанологических данных, получаемых методами дистанционного зондирования и иными способами исследования гидрометеорологической обстановки (ГМО) районов плавания, возникает проблема неравномерности распределения данных, что влияет на характер слоёв ПНПИ. Это может быть определено при построении и визуализации каждого слоя. Изолинии в таких слоях имеют выраженный ломанный характер, а шаг регулярной сетки прогноза является слишком большим. В результате нехватки данных, возникает проблема при решении задач автоматизированного поиска оптимального пути судна. В данной статье предлагается решить проблему сглаживания полей ПНПИ и приближённо восстановить необходимые данные гидрометеорологических полей в уточнённой регулярной сетке методом интерполяции бикубическим сплайном.

**Ключевые слова:** бикубическая сплайн-интерполяция, гидрометеорологическое обеспечение судовождения, послойное наложение погодной информации, прогноз погоды

**Для цитирования:** Филатов В.И. Построение слоёв гидрометеорологических данных и их интерполяции методом бикубического сплайна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 136—142.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.018>

### Hydrometeorological data layers of plotting and it's interpolation by b-cubic splines

Viktor I. Filatov<sup>1</sup> Filatov\_viktor1994@mail.ru

<sup>1</sup> Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** There are methods of step-layered Weather information Overlay plotting (LWIO) demonstrated. LWIO could be integrated in Electronic Chart Display and Information System (ECDIS). Also, another problem had been stated – increasing of resolution of Ship's Weather forecasts and smoothing of weather hydrometeorological (HMC) fields. Operative, statistical and prognostic data of HMC could be received on the vessel in different representative Data. In the article there are demonstrated examples of creating the models by different ways. There is a huge amount of hydrometeorological data which could be obtained by remote sensing methods or another modern method of research of Weather condition of Voyage area. But still the problem of the "Lack of information" has been existing. It could be clearly observed if the layer of Hydrometeorological data to be plotted and covered the vector electronic chart (ENC). Isolines in such layer are seriously fractured. Also, the step of each axis is huge. Thus, there is could be a problem if determine and calculate the automated Ship's Voyage Plan due to lack of hydrometeorological data. In this article described the method of smoothing and approximate restoring of weather date by the way of interpolation with the b-cubic spline.

**Key words:** b-cubic spline interpolation, Hydrometeorological support of Navigation, layered Weather information Overlay, Weather forecast

**For citation:** Viktor I. Filatov. Hydrometeorological data layers of plotting and it's interpolation by b-cubic splines Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 136—142.

#### Введение

Системы гидрометеорологического обеспечения (СГМО) судоходства широко используются для обеспечения безопасности мореплавания. Они используют данные, полученные от крупнейших служб гидрометеорологического мониторинга, таких

как: Japan meteorological company, Tropical Prediction Center USA, Ocean Prediction Centre USA, European Centre Medium-Range Weather Forecasts и т.д. СГМО передают на суда данные в цифровом формате по средствам спутниковой связи и сети Интернет.

В Конвенции СОЛАС (глава V, правило 34 «Безопасная навигация и уклонение от опасных

ситуаций» и в приложении А.24 «Планирование рейса» изложены требования о том, как судно должно готовиться к рейсу и планировать маршрут.

В приложении, для судов, указана важность следующих аспектов:

- проверка прогноза погоды по маршруту рейса;
- знание приливов и отливов;
- знание ограничений для судна в условиях ожидаемой погоды и волн [3, 4].

ЭКНИС имеет набор информационных наложений на векторную электронную карту (ВЭК), таких как: радиолокационное информационное наложение (РИО), АИС информационное наложение (АИС ИО), Адмиралтейское информационное наложение (АИО), НАВТЕКС наложение и др. Современные СГМО в совокупности с мощными ЭВМ, используемыми в ЭКНИС, способны обеспечить судно детализированным ГМП. Судоводитель, имеет возможность изучить и оценить гидрометеорологическую обстановку на предстоящем морской переход. Такая оценка состояния ГМО, в решениях прикладных задач планирования рейса, выполняется на основе изучения численных значений элементов множества ГМО, а также методом визуализации погоды – наложением информационного слоя непосредственно на векторную электронную карту (ВЭК), в иностранной литературе такое наложение называется – Weather overlay. В данной статье обозначим такой термин – ПНПИ (послойное наложение погодной информации). Широкое

применение обрела практика интегрирования ПНПИ в ЭКНИС и другие навигационные информационные системы (НИС). При таком методе наложения, в едином векторном пространстве, послойно, представлены оперативные прогнозы ( $T_w = 12 \div 24$  часа), краткосрочные прогнозы ( $T_w < 1,5 \div 3$  сут), и долгосрочные ( $T_w > 7$  сут). Структурная схема морских информационных наложений представлена на рис.1.

ПНПИ ГМО как правило включает в себя, но не ограничивается, следующим набором слоёв:

слой отображения ветра (сезонные, постоянные, модельные, стохастические и т.д.);

– слой отображения течений (приливо-отливные, океанские, постоянные, сезонные, поверхностные и т.д.);

– слой отображения волнения (модельный, по показаниям буев для измерения морского волнения);

– слой отображения атмосферного давления, представленный изолиниями барического давления – изобарами;

– слой отображения ледовой обстановки – толщина льда, соотносимая со стадией его развития, возраст льда, форма льда, дрейф льда;

– слой температурных данных акватории, и атмосферы выраженным горизонтальным температурным градиентом моря и атмосферы соответственно.;

– прочие слои дополнительной информации.

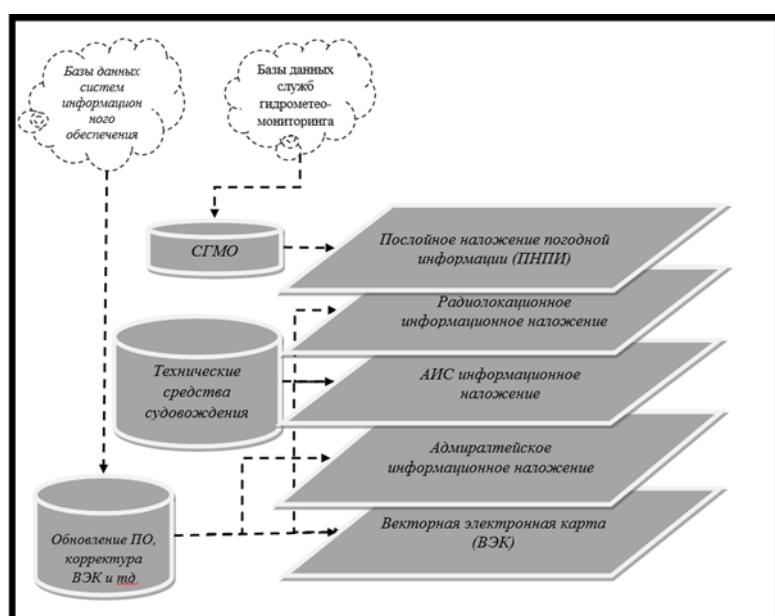


Рис. 1. Структура морских информационных наложений (MIO) в ЭКНИС

Известно, что в период плавания, на скорость судна наибольшее влияние оказывают: ветер, течение и волнение, а на температуру груза – температура забортной воды и атмосферы. Эти элементы ГМО могут быть использованы в решении задач о поиске оптимального пути судна (ПОПС). Для создания модели ПНПИ ГМО необходимо выделить основные элементы каждого погодного явления:

- для ветра:  $q(w)_i$  – направление ветра, град.,  $v(w)_i$  – скорость ветра, узл.;

– для течения:  $q(c)_i$  – направление течения град.,  $v(c)_i$  – скорость течения, узл.;

– для волнения:  $q(wa)_i$  – направление волнения, град.,  $\tau(wa)_i$  – период волнения, с.,  $h(wa)_i$  – высота волны, м.,  $v(wa)_i$  – скорость волнового нагона, узл.;

– для температуры поверхности воды –  $t_i$ , °C.

На этапе планирования перехода, при работе с СГМО, судоводитель определяет область, в пределах которой будет получен доступ к ГМП, степень детализации прогноза, а также его

продолжительность. Например, сервис ECMWF может предоставить прогноз погоды на период  $T=10$  суток, а дискретность сетки при этом  $k = \Delta\varphi = \Delta\lambda = 1.5^\circ$ . По совокупности критериев запроса формируется набор векторов ПНПИ, являющийся множеством нестационарных полей (зависящих от времени) – полей, каждое из которых является временным рядом с заданной дискретностью, например  $\Delta t = 6$  часов. Такая дискретность обусловлена ограничениями самой СГМО, в которую поступают данные от крупнейших погодных сервисов (NWS, BRACKNEL, ECMWF и т.д.).

В данной работе предлагается рассмотреть несколько примеров построения модели ПНПИ на примере полей температур и ветра, а затем использовать метод интерполяции бикубическим сплайном для уточнения и сглаживания данных. Моделирование состоит из нескольких этапов: формирование области получения прогноза ГМО на переход, построение векторного поля, уточнение поля методом интерполяции бикубическим сплайном и построение уточнённого векторного поля. В качестве модели использованы данные векторных полей, полученные из: NOAA NESDIS National Climatic Data Center, Source: Multiple satellite observations: DMSP SSMI F08, F10, F11, F13, F14 F15; TMI; QuikSCAT; AMSR-E; Direction from NCEP Reanalysis-2 [9].

## 1. Формирование области получения судового гидрометеорологического прогноза

Пусть задана прямоугольная область пространства,ложенная на земную сферу, ограниченная географическими координатами  $\Omega_{\text{ПНПИ}} = [\varphi_{min}, \varphi_{max}] \times [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ . Множество слоёв может быть описано, как  $L_{\text{ПНПИ}} = \{L_1, L_2, \dots, L_n | L_n \in \Omega_{\text{ПНПИ}}\}$ . Обозначим множество гидрометеорологических навигационных параметров, зависящих от времени (ГНП) –  $U_{\text{ГМП}} = \{U_w, U_c, U_{wa}, U_{ti} \dots, U_n\}$ , где  $U_i = f(t)$ . Каждый слой является поверхностью определена, как набор  $L_i = \langle U_i, P_i \rangle$ .  $P_i = \{(\varphi_i^k, \lambda_j^k), i = \overline{0, n_k}, j = \overline{0, n_k}\}$  набор географических координат внутри  $\Omega_{\text{ПНПИ}}$ ,  $i$  – направляющий орт оси ординат Оφ,  $j$  – направляющий орт оси абсцисс Оλ, О – начало координат в моделируемой системе. Тогда прямоугольная равномерная географическая координатная сетка задаётся, как:

$$\Omega_{\text{ПНПИ}} = \{(\varphi_i, \lambda_i) | \varphi_i + ik_x, \lambda_j + jk_y; i = \overline{0, N}; j = \overline{0, M}\},$$

(1), где  $k_x, k_y$  – значения шага сетки;  $N, M$  – количество узлов сетки вдоль осей  $[\varphi_{min}, \varphi_{max}], [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ , соответственно, тогда:

$$k_x = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{min}}{N}; k_y = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{M} \quad (2)$$

При численном моделировании использован ГМП с шагом сетки  $k_x = k_y = 1.0^\circ$ , аналогично тому, с какой дискретностью на судно поступает прогноз ГМО.

## 2. Формирование и построение векторных полей данных ГМО

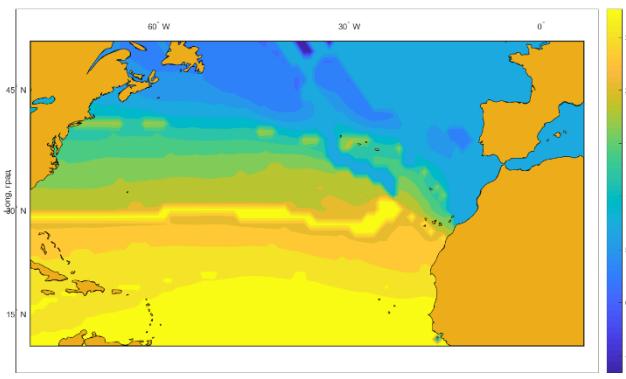
Каждый элемент ПНПИ может быть задан по-разному. Одни слои задаются скалярным полем, другие – векторным. В большей степени это зависит от того, в каком формате получен прогноз.

### 2.1. Формирование и построение скалярных полей.

Примером скалярного поля являются элементы слоя волнения:  $\tau(wa)$ ,  $h(wa)$ ; и элементы слоя температур  $-t_i$ . Пусть  $x = f(\lambda), y = f(\varphi)$ . Скалярное поле в ПНПИ задаётся стандартным способом – с помощью координат скалярного поля, каждому вектору плоскости ставящего в соответствие длину этого радиус-вектора –  $\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j}$ , где  $x, y$  – координаты радиуса-вектора, где  $\vec{i}, \vec{j}$  направляющие орты. Можно составить уравнение, для чего двумя способами записывается отображение функции  $f$  на радиус-векторе  $\vec{r} : f(\vec{r}) = |\vec{r}|$ . Тогда уравнение скалярного поля имеет вид:

$$f(x \vec{i} + y \vec{j}) = |x \vec{i} + y \vec{j}| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

Например, с помощью скалярного поля может быть описано распределение температур по поверхности акватории. Чтобы построить скалярное поле, описанное уравнением 3, необходимо выполнить переход от скалярного поля к векторному, для этого



необходимо вычислить градиент скалярного поля:

$$\nabla f = \left( \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{j} \quad (4)$$

На рисунке 2 приведён пример построения слоя температуры поверхности Атлантического океана. На слое можно увидеть линии уровня скалярного поля температур – изотермы.

Рис. 2 Слой «Температуры» в ПНПИ. На векторной карте представлена модель градиента скалярного поля распределения температуры поверхности воды на акватории Атлантического океана.

### 2.2. Задание и построение векторных полей

Элементы таких слоёв, как «ветер», «течение», «волнение» могут быть заданы стандартным способом задания векторного поля.

Возьмём произвольную точку и выразим радиус-вектор через её координаты —  $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j}$ , т.е. вектора из области определения векторного поля. Координаты из области значений векторного поля —  $P\vec{i} + Q\vec{j}$ , где координаты  $P, Q$  зависят от значений переменных в аргументах -  $x, y$ .

Тогда в стандартном виде векторное поле на поверхности  $\Omega_{\text{ПНПИ}}$  может быть задано, как  $\vec{a}(\vec{r}) = P(x; y)\vec{i} + Q(x; y)\vec{j}$  или:

$$\vec{a}(\vec{r}) = P(\vec{r})\vec{i} + Q(\vec{r})\vec{j} \quad (5).$$

[6] Предлагается рассмотреть пример моделирование векторного поля на примере поля «ветер». Введём значения исходной функции. Пусть  $\vec{v}_w = u\vec{i} + v\vec{j}$  — вектор скорости ветра со своими координатами —  $u, v$ . Формализуем координаты значений, как:

$$\begin{cases} u(x, y) = v(w) \sin q(w) \\ v(x, y) = v(w) \cos q(w) \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом получим уравнение для задания векторного поля:

$$\vec{v}_w(x\vec{i} + y\vec{j}) = (v(w) \sin q(w) - x)\vec{i} + v(w) \cos q(w)\vec{j}$$

(7). На рис. 3, 4 предстаенна модель векторного поля ветра на поверхности акватории Атлантического океана, на рис. 5 представлена модель поверхности над полем  $\vec{v}_w$ .

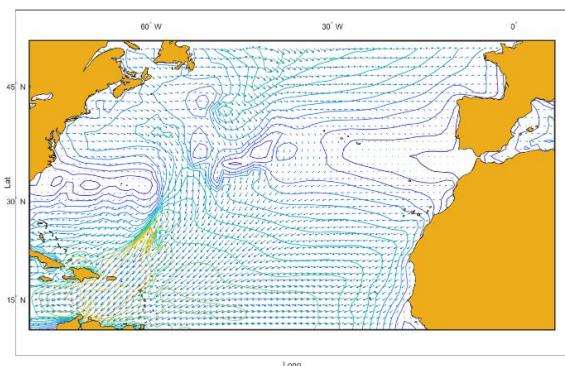


Рис. 3 Слой «ветра» в ПНПИ. На векторной карте представлена модель векторного поля ветра на поверхности Атлантического океана

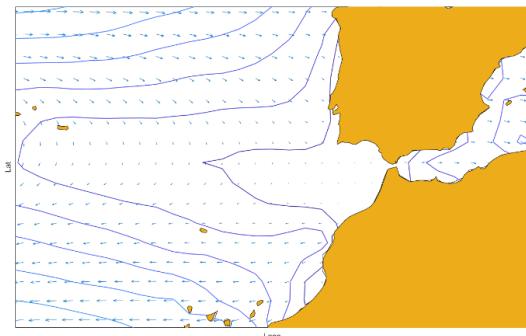


Рис. 4 Векторное поле ветра на поверхности Атлантического океана – район пролива Гибралтар

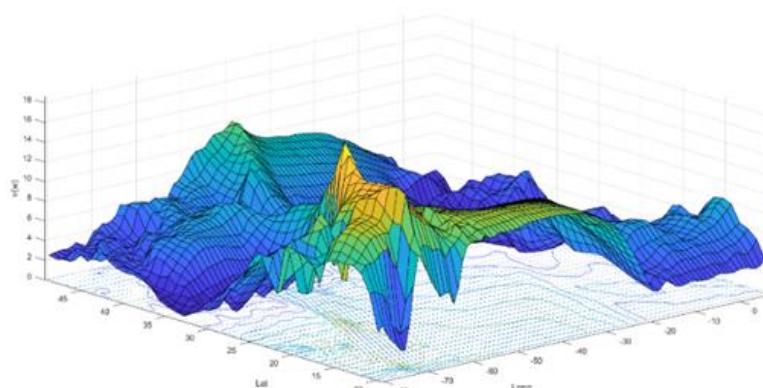


Рис. 5 Модель поверхности скорости ветра над векторным полем ветра, Атлантический океан

На рис 3, 4, 5 видно, что при построении векторного поля видны разрывы, и изолинии получаются «ломанными». Причиной этому является недостаток данных из-за больших значений  $k_x, k_y$ , что является ограничением служб гидрометеорологического мониторинга.

### 3. Интерполяция поверхности и построение сглаженного

Последним этапом формирования и построения слоя ПНПИ является уточнение данных ГМП. Для повышения детализации прогноза и его сглаживания. Предлагается повысить его частоту дискретизации и использовать двумерную интерполяцию — точное нахождение функции по известным отдельным значениям, заданным таблицей. [1, 2]

Существует множество способов интерполяции табличной функции. Наиболее применяемым методом является интерполяция полиномами:

- линейная
- конечно-разностным методом
- интерполяция методом Ньютона
- полиномы Лагранжа
- сплайны, кубические сплайны и т.д.

Рассмотрим поверхность  $\vec{L}(\vec{w})$  как трёхмерный вектор, который может быть представлен на плоскости контурным графиком и зависит от двух аргументов. В данной работе приближённо восстановить поверхность слоёв предлагается с помощью интерполяции сплайном — сплайном, проходящим через все значения табличной функции. В исследовании [7] данный метод интерполяции

показал, что можно получить поле с небольшой ошибкой, близкой к минимальной. Для построения двумерных сплайнов обычно используется область определения в виде прямоугольной сетки  $\Omega_{\text{ПНПИ}}$ , значения узлов которой определяются контрольными точками, заданными табличной функцией. В этом случае построение двумерного сплайна (называемого бикубический сплайном) можно выполнить через произведение одномерных сплайнов по каждой из переменных [5]:

$$L(\tilde{u}, \tilde{v}) = \sum_{i=k-1}^{k+2} \sum_{j=l-1}^{l+2} U_{ij} \xi_i(\tilde{u}) \xi_j(\tilde{v}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$$

$$L(\tilde{u}, \tilde{v}) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [P] \begin{bmatrix} 2 & -3 & 0 & 1 \\ -2 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w^3 \\ w^2 \\ w \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

где матрица  $P$  разложена, как:

$$P = \begin{bmatrix} U_{ij} & U_{i,j+1} & \Delta U_j(i, j) & \Delta U_j(i, j + 1) \\ U_{i+i,j} & U_{i+1,j+1} & \Delta U_j(i + 1, j) & \Delta U_j(i + 1, j + 1) \\ \Delta U_i(i, j) & \Delta U_i(i, j + 1) & \Delta U_j[\Delta U_i(i, j)] & \Delta U_j[\Delta U_i(i, j + 1)] \\ \Delta U_i(i + 1, j) & \Delta U_i(i + 1, j + 1) & \Delta U_j[\Delta U_i(i + 1, j)] & \Delta U_j[\Delta U_i(i + 1, j + 1)] \end{bmatrix} \quad (9)$$

где:  $x_i \leq \tilde{u} \leq x_{i+1}$ ,  $t = \tilde{u} - x_i$ ,  $x_{i+1} - x_i = 1$ ,  $y_i \leq \tilde{v} \leq y_{i+1}$ ,  $w = \tilde{v} - y_i$ ,  $y_{i+1} - y_i = 1$  и  $\Delta U_i(k, l) = \frac{1}{2}[U_{k+1,l} - U_{k-1,l}]$ ,  $\Delta U_j(k, l) = \frac{1}{2}[U_{k,l+1} - U_{k,l-1}]$ ,  $k = 2, \dots, n - 1$ ,  $l = 2, \dots, m - 1$ .

Интерполированные значения зависят от расположения  $(t, w)$  и матрицы (9). Из матрицы видно, что  $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$  элементы – значения в четырёх точках окрестности  $(\tilde{u}, \tilde{v})$ . Элементы  $P_{13}, P_{14}, P_{23}, P_{24}$  – частные производные  $\partial U / \partial y$  в этих четырёх точках,  $P_{31}, P_{32}, P_{41}, P_{42}$  элементы – частные производные  $\partial U / \partial x$ . Четыре нижних элемента справа  $P_{33}, P_{34}, P_{43}, P_{44}$  – смешанные производные. С помощью них определяется вращение поверхности в углах прямоугольной регулярной сетки, которая содержит  $(\tilde{u}, \tilde{v})$ . В большинстве программ их упрощают, тогда:  $P_{33} = P_{34} + P_{43} + P_{44} = 0$ . В таком случае необходимо определить только частные производные первого порядка.

Результатом интерполяции бикубическим сплайном является сглаженная поверхность слоя  $L_w$  с контролируемой частотой дискретности сетки. Достигается увеличение частоты дискретизации путём сужения значений прямоугольной сетки с помощью введения параметра сглаживания  $k_p$  [8]. Вычислив значения интерполированной функции, можно построить поверхность в уточнённой сетке координат:

$$\begin{cases} u_k = x_i + \frac{(k-1)(x_{i+1}-x_i)}{k_p}, k = \overline{1, k_p + 1} \\ v_l = y_j + \frac{(l-1)(y_{j+1}-y_j)}{k_p}, l = \overline{1, k_p + 1} \end{cases} \quad (10)$$

На рисунках 6, 7, 8 представлены результаты построение уточнённой модели поля ветра из примера на рис. 3, 4 и сглаженной поверхности модели, представленной на рис. 5, при  $k_x = k_y = 0,25^\circ$ .

(7), где:  $\xi(\tilde{u}), \dots, \xi_n(\tilde{u}), \xi_j(\tilde{v}), \dots, \xi_m(\tilde{v})$  – множества базисных функций одномерного эрмитового кубического сплайна.  $\tilde{u} \in [x_1, x_{k+1}]$ ,  $\tilde{v} \in [y_1, y_{l+1}]$  – координаты точек пространства поверхности, предполагается, что  $k > 1, l > 1, k < n, l < m$ . Как следствие, каждое интерполированное значение зависит только от начального значения  $U_{ij}$  в шестнадцати соседних точках сетки. Используя определения базисов  $\xi_i, \xi_j$  можно представить поверхность, как матричное уравнение вида:

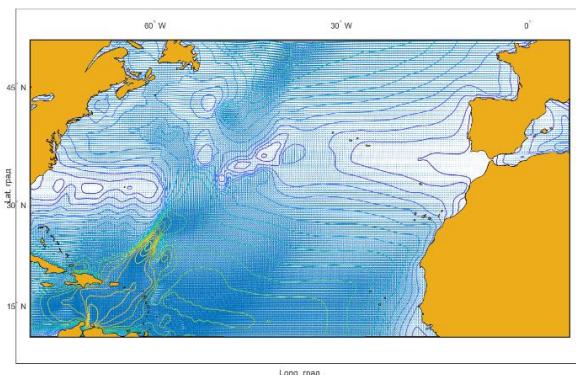


Рис. 6 Модель интерполированного векторного поля ветра и слой «ветра» в ПНПИ

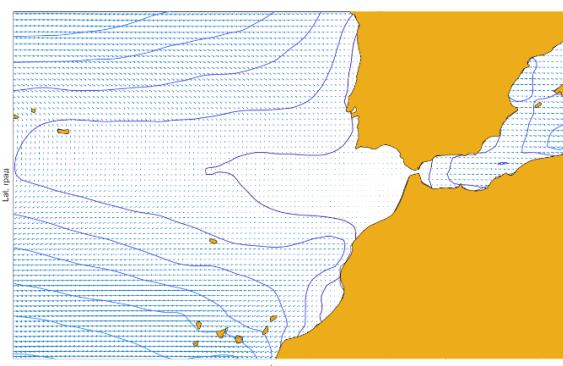
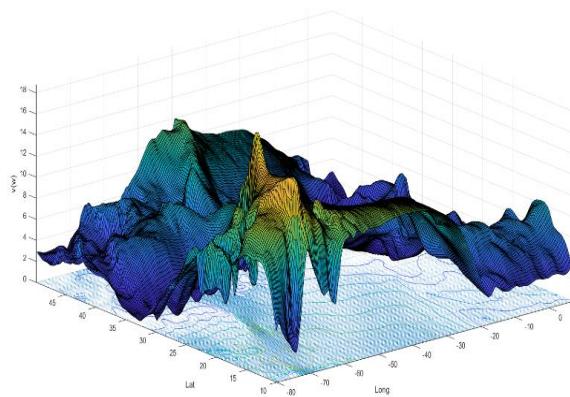


Рис. 7 Модель интерполированного векторного поля ветра на поверхности Атлантического океана – район пролива Гибралтар



*Рис. 8 Модель интерполированной поверхности скорости над векторным полем ветра на акватории Атлантического океана*

### **Заключение**

В статье описаны основные элементы ПНПИ, как одного из информационных наложений в системе ЭКНИС, приведены модели наложения различных слоёв (температур, ветра) на ВЭК. Сформулирована проблема недостатка информации при решении задачи о поиске оптимального пути судна. Приближённое решение может быть достигнуто методом интерполяции исходного поля бикубическим сплайном. Этот метод уже реализован

во многих географических информационных системах (ГИС) для исследований в различных областях, но не используется в ЭКНИС. Результаты численного моделирования приведены на рис 6, 7, 8. По характеру поверхности на рисунках видно, что удалось получить более гладкие изолинии в сравнении с теми, которые представлены на рис. 3, 4, 5. Удалось значительно увеличить частоту дискретизации регулярной сетки. В задачах о поиске оптимального маршрута судна, метод интерполяции набора поверхностей бикубическим сплайном может быть использован в тех случаях, если:

- в некоторых районах плавания частично отсутствует или имеется недостоверная информация ГМП;
- изолинии в ГМП, полученном от СГМО, имеют явные «изломы» и требуется их сгладить;
- используется долгосрочный прогноз для поиска оптимального пути судна при морском переходе;
- если необходимо выполнить поиск локального маршрута при отклонении от линии заданного пути, при маневрировании и т.д.

Очевидным недостатком метода является то, что относительно мало реальных физических процессов описывается данными зависимостями, поэтому новые данные, полученные интерполяцией, являются лишь приближённым решением. Качество модели, в большей степени зависит от исходных данных, полученных от СГМО.

### **Литература**

1. Алберг, Д. Теория сплайнов и ее приложения. Д. Алберг, Э. Нильсон, Д. Уолш ; под ред. С. Б. Стечкина ; пер. с англ. Ю. Н. Субботина., Москва: Мир, 1972. – 319 с. Режим доступа: по подписке: URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=456937> – Текст: электронный.
2. Василенко В.А. Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы. - Новосибирск: Наука, 1983. - 214 с.
3. Васильев К. П. -Что должен знать судоводитель о картах погоды и состояния моря. - Л.: Гидрометеоиздат, 1980. - 231 с.
4. ВМО-№ 471. Руководство по морскому метеорологическому обслуживанию. - Женева, Швейцария, 2018. – 93 с.
5. Задорожный А. Г. Построение сплайнов с использованием библиотеки OpenGL. А. Г. Задорожный, Д. С. Киселев. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019, – 88 с.
6. Н.В. Мельникова. Основы векторного анализа: Учебное электронное текстовое пособие. Н.В. Мельникова, Ю.Б. Мельников, Ю.Ю. Мельникова. Екатеринбург: Издательство ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ, 2006, - 152 с.
7. Новикова А.М., Полонский А.Б., Новиков А.А. сравнение возможностей интерполяционных модулей qgis для морских климатических исследований при работе с массивом данных малой обеспеченности. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2016;22(1):76-88.
8. Brunet Crosa, Pere; Pérez Vidal, Lluis. "Smooth contour line construction with spline interpolation". Qüestiió. 1984, vol. 8, núm. 3
9. Wentz, F.J., J. Scott, R. Hoffman, M. Leidner, R. Atlas, J. Ardizzone, 2015: Remote Sensing Systems Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) 6-hourly ocean vector wind analysis product grid, Version 2.0. Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA. Available online at [www.remss.com/measurements/ccmp](http://www.remss.com/measurements/ccmp).

### **References**

1. Alberg, D. Teorija splajnov i ee prilozhenija [Spline theory and its applications]. D. Alberg, Je. Nil'son, D. Uolsh ; pod red. S. B. Stechkin ; per. s angl. Ju. N. Subbotina., Moscow: Mir, 1972. – 319 s. Rezhim dostupa: po podpiske: URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=456937> – Tekst: elektronnyj.
2. Vasilenko V.A. Splajn-funkcii: teorija, algoritmy, programmy. [Spline functions: theory, algorithms, programs], Novosibirsk: Nauka, 1983, 214 s.
3. Vasil'ev K. P. Chto dolzhen znat' sudovoditel' o kartah pogody i sostojanija morja .[What a boatmaster should know about weather maps and sea conditions], L.: Gidrometeoizdat, 1980, 231 s..
4. VMO-№ 471. Rukovodstvo po morskemu meteorologicheskemu obsluzhivaniju. [Marine Meteorological Service Manual.], Zheneva, Shvejcarija, 2018, 93 s.
5. Zadorozhnyj A. G. Postroenie splajnov s ispol'zovaniem biblioteki OpenGL. [Building splines using the library OpenGL]. A. G. Zadorozhnyj, D. S. Kiselev. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet, 2019, 88 s.

6. N.V. Mel'nikova. Osnovy vektornogo analiza: Uchebnoe elektronnoe tekstovoe posobie. [Fundamentals of vector analysis: An electronic text textbook.], N.V. Mel'nikova, Ju.B. Mel'nikov, Ju.Ju. Mel'nikova. Ekaterinburg: Izdatel'stvo GOU-VPO UGTU-UPI, 2006, 152 s.
7. Novikova A.M., Polonskij A.B., Novikov A.A. Sravnenie vozmozhnostej interpolacionnyh modulej qgis dlja morskikh klimaticheskikh issledovanij pri rabote s massivom dannyh maloj obespechennosti. [Comparison of the capabilities of qgis interpolation modules for marine climate research when working with a small data set.], Materialy Mezhdunarodnoj konferencii «InterKarto. InterGIS». 2016;22(1):76-88..
8. Brunet Crosa, Pere; Pérez Vidal, Lluis. Smooth contour line construction with spline interpolation. Qüestiió. 1984, vol. 8, núm. 3
9. Wentz, F.J., J. Scott, R. Hoffman, M. Leidner, R. Atlas, J. Ardizzone, 2015: Remote Sensing Systems Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) 6-hourly ocean vector wind analysis product grid, Version 2.0. Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA. Available online at [www.remss.com/measurements/ccmp](http://www.remss.com/measurements/ccmp)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Виктор Иванович Филатов**, аспирант кафедры «судовождение», государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Filatov\_viktor1994@mail.ru. **Viktor I. Filatov**, graduate student of the Department of Navigation Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Filatov\_viktor1994@mail.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.11.2021.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.03.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 05.04.2022.

**Научная статья**

УДК 550.34.01

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.019>

## Имитация работы донных сейсмографов с применением искусственных нейронных сетей

Т.Г. Асланов<sup>1</sup> [tabasik@gmail.com](mailto:tabasik@gmail.com), Т.Г. Айгумов<sup>2</sup> [915533@mail.ru](mailto:915533@mail.ru)

<sup>1</sup>Современные инженерные и информационные технологии, <sup>2</sup>Дагестанский государственный технический университет

**Аннотация.** В работе для локализации сейсмических событий предлагается использовать суда в Каспийском море. Используя гидрофон на корабле, можно зафиксировать время прихода гидроакустической волны (продольной волны). Зная параметры водной среды, а также рельеф дна, можно вычислить координаты и время прихода продольной сейсмической волны к границе земной и водной сред. После некоторых преобразований, подав полученное время в нейронную сеть, можно получить информацию о разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн в указанной точке морского дна. Для обучения нейронной сети, в течении года, на донном сейсмографе, локация которого постоянно меняется, необходимо производить сбор информации о происходящих сейсмических событиях. Для формирования обучающей выборки необходимо собрать информацию о разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн до каждого наземного и донного сейсмического датчика, о разности времен пробега продольной сейсмической волны до каждого наземного сейсмического датчика, относительно донного сейсмографа, а также координаты донного сейсмографа. На основе математической модели была проверена возможность обучения нейронной сети имитировать информацию по разности времен пробега сейсмических волн на донном сейсмографе при помощи морского судна. Для обучения искусственной нейронной сети использовалась многослойная сеть с 60 скрытыми слоями с функцией активации – сигмоиды. В качестве входов в нейронную сеть использовались нормированные разности времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн от гипоцентра землетрясения до каждого сейсмического датчика, нормированные разности времен прихода продольной сейсмической волны до каждого наземного сейсмического датчика относительно донного сейсмографа, а также нормированные координаты донного сейсмографа. Таким образом, у нейронной сети всего 37 входов. Выходом искусственной нейронной сети является разность времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн до донного сейсмографа.

**Ключевые слова:** морское дно, сейсмические волны, гидроакустическая волна, скорость, гипоцентр, нейронная сеть, ошибки, судно

**Финансирование:** Исследования выполнены при поддержке гранта Главы Республики Дагестан

**Для цитирования:** Асланов Т.Г., Айгумов Т.Г. Имитация работы донных сейсмографов с применением искусственных нейронных сетей, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 143—148.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.019>

## Simulation of the operation of bottom seismographs using artificial neural networks

Tagirbek G. Aslanov<sup>1</sup> [tabasik@gmail.com](mailto:tabasik@gmail.com), Timur G. Aygumov<sup>2</sup> [915533@mail.ru](mailto:915533@mail.ru)

<sup>1</sup>Modern engineering and information technologies, Makhachkala, Russian Federation, <sup>2</sup>Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation

**Abstract.** The article proposes using vessels in the Caspian Sea to localize seismic events. Using a hydrophone on the ship, it is possible to record the arrival time of a hydroacoustic wave (longitudinal wave). Knowing the parameters of the aquatic environment, as well as the bottom relief, it is possible to calculate the coordinates and time of arrival of a longitudinal seismic wave to the boundary of terrestrial and aquatic environments. After some transformations, by feeding the received time into the neural network, it is possible to obtain information about the difference in the travel times of longitudinal and transverse seismic waves at the specified point of the seabed. To train a neural network, during the year, on a bottom seismograph, the location of which is constantly changing, it is necessary to collect information about ongoing seismic events. To form a training sample, it is necessary to collect information about the difference in the travel times of the longitudinal and transverse seismic waves to each ground and bottom seismic sensor, about the difference in the travel times of the longitudinal seismic wave to each ground seismic sensor, relative to the bottom seismograph, as well as the coordinates of the bottom seismograph. On the basis of a mathematical model, the possibility of training a neural network to simulate information on the difference in the travel times of seismic waves on a bottom seismograph using a marine vessel was tested. To train an artificial neural network, a multilayer network with 60 hidden layers with a sigmoid activation function was used. The inputs to the neural network were normalized differences in the arrival times of longitudinal and transverse seismic waves from the earthquake hypocenter to each seismic sensor, normalized differences in the arrival times of the longitudinal seismic wave to each ground seismic sensor relative to the bottom seismograph, as well as normalized coordinates of the bottom seismograph.

Thus, the neural network has only 37 inputs. The output of an artificial neural network is the difference in the arrival times of longitudinal and transverse seismic waves to the bottom seismograph.

**Keywords:** seabed, seismic waves, hydroacoustic wave, velocity, hypocenter, neural network, errors, vessel

**Financial Support:** The research was carried out with the support of a grant from the Head of the Republic of Dagestan

**For citation:** Tagirbek G. Aslanov, Timur G. Aygumov, Simulation of bottom seismographs using artificial neural networks, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 143—148.

## Введение

Всероссийским научно-исследовательским институтом по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям (ВНИИ ГОЧС) МЧС России разработана программа, позволяющая по магнитуде землетрясения, глубине его очага, плотности населения в районе землетрясения, типам застроек [1], времени суток и т.д. оценить людские потери, что позволяет оперативно решить вопрос о количестве привлекаемых к спасательным работам людских, материальных и технических ресурсов [2-4].

Однако оценки потерь иногда не соответствуют действительности, в основном из-за неверного определения глубины и эпицентра землетрясения, что вызвано в том числе неверным выбором для расчета очага землетрясения сейсмических датчиков на местности [5-8].

Так, в частности, во время Иранского землетрясения (с эпицентром в районе г. Бам) 26 января 2003 года Федеральным центром науки и высоких технологий «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям» МЧС России были оценены как без потерь, хотя потери были. Ошибка возникла в связи с тем, что геофизическими службами Ирана глубина очага была определена неверно (сначала считалось, что глубина равна 33 км, а в последующем – 15 км). После корректировки величины глубины очага землетрясения в исходных данных в программе, расчетные потери были оценены в количестве 30 000 человек. В то же время, только на второй день, по сообщениям официальных иранских властей потери были оценены в пределах от 2 до 40 тысяч человек, на третий день говорилось о 20 000 человек, и, только почти через месяц 21 января 2004 года предварительная оценка потерь составила 35 000 человек [9, 10].

В настоящей статье предложен метод имитации работы донного сейсмографа с использованием искусственных нейронных сетей, а также использование морских судов для локализации сейсмических событий.

## Имитация работы донного сейсмографа

В среднем в год на территории Республики Дагестан происходит свыше двух тысяч сейсмических событий, при этом координаты части из них расположены под водами Каспийского моря. Определение координат такого рода землетрясений сопряжено со значительными ошибками, в связи с тем, что все сейсмические станции расположены по одну сторону от очага землетрясения.

Ошибки, возникающие при расположении сейсмических датчиков по одну сторону от гипоцентра землетрясения приведены на рис.1, где в точках  $S_1$  и  $S_2$  расположены сейсмические станции, на удалениях  $R_1$  и  $R_2$  от истинного очага землетрясения  $O_i$ .  $O_p$  – расчетные координаты очага землетрясения.  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – ошибки в определении удалений сейсмических датчиков от очага землетрясения. Как видно по рисунку, при расположении сейсмических датчиков по одну сторону от гипоцентра землетрясения, возникает значительные ошибки в определении гипоцентра [7].

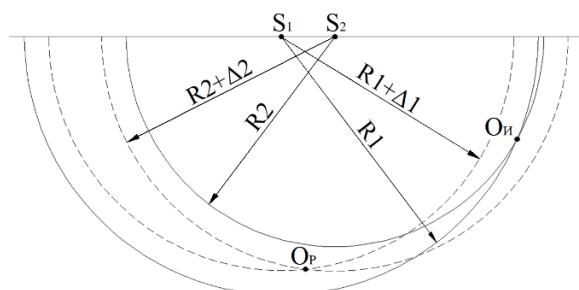


Рис. 1. Расположение сейсмических станций по одну сторону от гипоцентра землетрясения

Для локализации сейсмических событий могут быть использованы донные сейсмографы. Недостатком использования донных сейсмографов можно считать отсутствие в них возможности получения данных о сейсмических событиях без их извлечения с морского дна.

Для решения указанной проблемы возможно сымитировать работу донного сейсмографа при помощи искусственных нейронных сетей, для этих целей на морском дне размещаются один или нескольких донных сейсмических датчиков.

На наземных и донных сейсмических датчиках в течении года рассчитываются разности времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн.

Для обучения нейронной сети, имитировать работу донных сейсмических датчиков, предлагается использовать в качестве входов в нейронную сеть разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн к наземным сейсмическим датчикам, а в качестве выходов, разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн к донным сейсмическим датчикам, которые необходимо сымитировать.

Результаты аналогичного обучения нейронной сети имитировать работу наземных сейсмических датчиков приведена на рис.2.

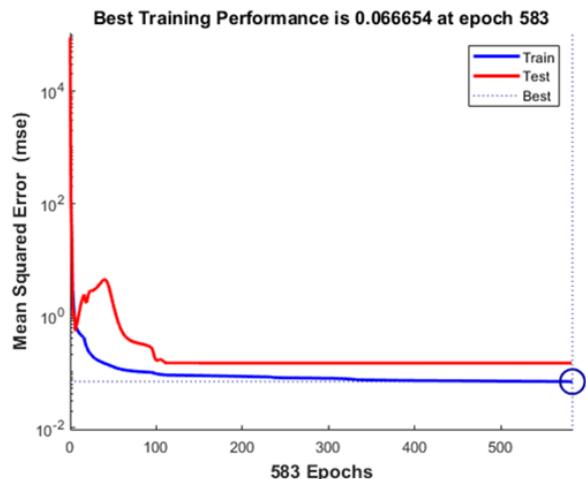


Рис. 2. Динамика обучения нейронной сети по эпохам

На рис.3 приведена гистограмма ошибок искусственной нейронной сети на сейсмическом датчике ARKR.

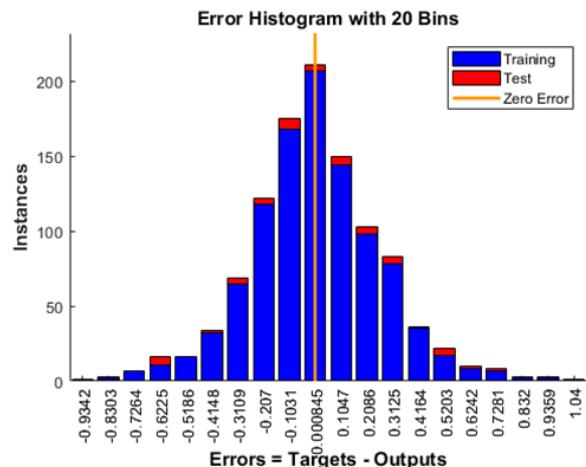


Рис. 3. Гистограмма ошибок искусственной нейронной сети на сейсмическом датчике ARKR

На рис.2 и рис.3 синим цветом обозначены результаты обучения искусственной нейронной сети на обучающей выборке, красным цветом – тестовая выборка.

Обученная нейронная сеть имеет коэффициент корреляции, с реальными значениями разности времен прихода сейсмических волн, равный 0,99956.

#### Использование морских судов для локализации сейсмических событий

Существует множество методов локализации сейсмических событий, в большинстве, котором используются комбинации из двух методов:

- с использованием фигуры второго порядка – гиперболоид, для которой необходима информация о разности времен пробега продольной сейсмической волны на разнесенные в пространстве сейсмические датчики (аналог радионавигационных систем Loran и Decca);

– с использованием фигуры второго порядка – сферы, для которой требуется информация о разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн от гипоцентра землетрясения до сейсмического датчика (аналог применяемый в спутниковой навигации GPS).

Использование методов локализации сейсмических событий, использующих фигуру второго порядка – гиперболоид ограничена в виду возникающих ошибок, связанных с тем, что продольная сейсмическая волна проходит участки с различными скоростями распространения сейсмических волн от очага землетрясения до каждого сейсмического датчика.

Указанный недостаток приводит к тому, что если скорости распространения сейсмических волн на местности неизвестны, то использование такого метода может привести к значительным ошибкам.

Методы, использующие для локализации сейсмических событий фигуру второго порядка – сферу мало подвержены вышеприведенным ошибкам, но в тоже время их использование невозможно, в случаях если по пути следования сейсмической волны имеется жидкая преграда. Это обусловлено тем, что в жидкых средах распространяется только один тип волн – продольный.

В связи с этим, надводные технические средства позволяют регистрировать только продольные сейсмические волны, что позволяет применять методы локализации сейсмических событий с использованием фигуры второго порядка – гиперболоид.

В качестве альтернативы предлагается использовать суда в Каспийском море для локализации сейсмических событий с использованием фигуры второго порядка – сфера при помощи искусственных нейронных сетей.

Для оценки возможности применения морских судов для локализации сейсмических событий, была создана компьютерную модель части Дагестана и Каспийского моря, размерами 250 на 250 километров с размещением на ней 17 сейсмографов с координатами, соответствующими реальным. Исследуемая область была разбита на 25 участков со случайнym расположением скоростей продольной и поперечной сейсмических волн на каждом из участков (Рис.4).

Задавая координаты очагов землетрясений и донного сейсмографа, с учетом закона Снеллиуса определялись разности времен пробега сейсмических волн к каждому из 18 сейсмических датчиков, а также разности времен пробега продольной сейсмической волны до каждого наземного сейсмического датчика относительно донного сейсмографа. Ко всем временам пробега сейсмических волн добавлялась случайная инструментальная ошибка в пределах от -0.5 до 0.5 секунд. Таким образом, для обучения искусственной нейронной сети была создана обучающая выборка из 2 500 землетрясений.

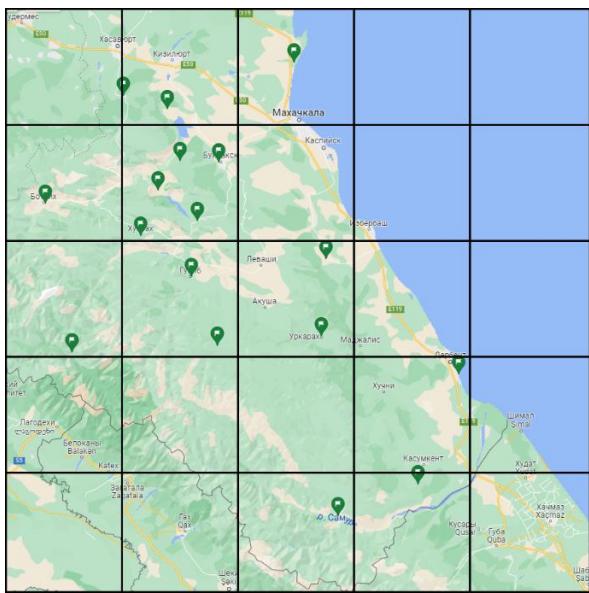


Рис. 4. Разбиение исследуемой территории на равные участки

Для обучения искусственной нейронной сети использовалась многослойная сеть с 60 скрытыми слоями с функцией активации – сигмоида. В качестве входов в нейронную сеть были использованы нормированные разности времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн от гипоцентра землетрясения до каждого сейсмического датчика, нормированные разности времен прихода продольной сейсмической волны относительно донного сейсмографа до каждого наземного сейсмического датчика, а также нормированные координаты донного сейсмографа. Таким образом, всего у нейронной сети 37 входов. Выходом искусственной нейронной сети является разность времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн до донного сейсмографа.

Результаты обучения нейронной сети приведены на рис.5.

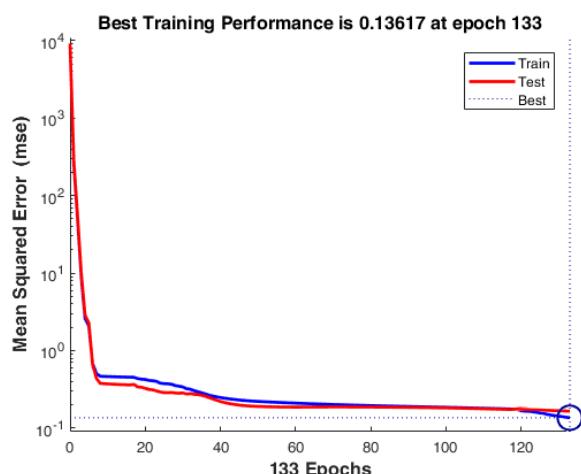


Рис. 5. Обучение нейронной сети по эпохам

На рис.6 приведена гистограмма ошибок обучения искусственной нейронной сети

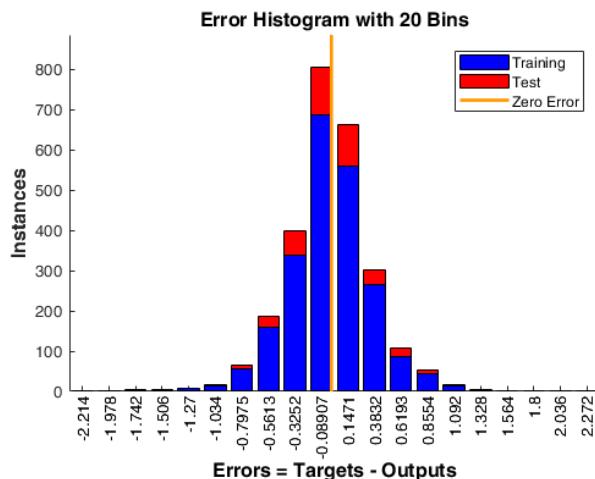


Рис. 6. Гистограмма ошибок нейронной сети

На рис.5 и рис.6 синим цветом обозначены результаты обучения искусственной нейронной сети на обучающей выборке, красным цветом – тестовая выборка.

Обученная нейронная сеть имеет коэффициент корреляции, с расчетными значениями разности времен прихода сейсмических волн, равный 0,99872.

Алгоритм применения искусственной нейронной сети на корабле состоит в следующем:

- используя гидрофон на корабле, фиксируется время прихода гидроакустической волны (продольной волны). Зная параметры водной среды, а также рельеф дна, можно определить координаты и время прихода продольной сейсмической волны к границе земной и водной сред.

- информация о координатах и времени регистрации сейсмической волны по радиоканалу передается в центр мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций.

- в центре мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций определяются разности времен прихода продольной сейсмической волны на наземных сейсмических станциях относительно времени, полученного на корабле и разность времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн на наземных сейсмических станциях.

- полученные разности времен и координаты ближайшей точки морского дна до корабля подаются на вход искусственной нейронной сети, которая на выходе позволит сымитировать работу донного сейсмографа в указанных координатах и вычислить разность времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн.

## Заключение

В статье предложен метод имитации работы донного сейсмографа, а также метод имитации донных сейсмографов с использованием морских судов в ближайших точках морского дна относительно судна.

При сильных сейсмических событиях, поперечные волны могут также преобразовываться на границах с водной средой в гидроакустическую волну, что позволит переобучать нейронную сеть по новым данным.

Имитация донного сейсмографа с координатами дна, наиболее близкими к судну обусловлены тем, что скорость продольной сейсмической волны в

несколько раз выше гидроакустической волны, вследствие чего, по фронту регистрируется гидроакустическая сейсмическая волна, преобразованная с продольной сейсмической волны

в точке морского дна, ближе всего расположенного к судну.

Ошибка работы нейронной сети находится в пределах заданной инструментальной ошибки сейсмографа.

### Литература

- Шахраманьян, М.А. Технология оценки устойчивости и сейсмостойкости зданий и сооружений / М.А. Шахраманьян, Г.М. Нигметов, М.Ю. Прошляков // Технологии гражданской безопасности. – 2004. – № 2(6). – С. 27-37
- Шахраманьян, М.А. Оценка сейсмического риска и прогноз последствий землетрясений в задачах спасения населения: (теория и практика) / М.А. Шахраманьян. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2000. – 192 с. – ISBN 5-93970-001-2
- Морозов, В.Н. Прогнозирование и ликвидация последствий аварийных взрывов и землетрясений (теория и практика) / В.Н. Морозов, М.А. Шахраманьян. – Москва : УРСС, 1998. – 272 с. – ISBN 5-88417-132-3
- Асланов Т.Г., Мусаева У.А. Анализ плотности распределения ошибок в определении координат очага землетрясения по методам сфер и эллипсоидов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(2): 61-70. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70
- Шахтарин, Б.И. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка - эллипса и гиперболы / Б.И. Шахтарин, Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – Т. 72. – № 11. – С. 503-509.
- Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):118-125. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125
- Асланов Т.Г., Магомедов Х.Д., Мусаева У.А., Тагиров Х.Ю. Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):73-84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84
- Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г., Тетакаев У.Р. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур четвертого и второго порядка – овала Кассини и гиперболы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 134-142. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142
- Рогожин Е.А. Землетрясение в Иране [Электронный ресурс] // География. Электронный журнал. 2004. № 5. Режим доступа: <http://geo.1september.ru/article.php?ID=200400503> [дата обращения: 24.01.2022]
- Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Мусаева У.А. Аномальные ошибки в определении координат очага землетрясений и предложения по их устранению. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(4): 78-88. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88

### References

- SHahraman'yan, M.A. Tekhnologiya ocenki ustojchivosti i sejsmostojkosti zdanij i sooruzhenij [Technology for assessing the stability and seismic resistance of buildings and structures] / M.A. SHahraman'yan, G.M. Nigmetov, M.YU. Proshlyakov // Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. – 2004. – № 2(6). – S. 27-37
- SHahraman'yan, M.A. Ocenna sejsmicheskogo riska i prognoz posledstvij zemletryasenij v zadachah spaseniya naseleniya: (teoriya i praktika) [Seismic risk assessment and prediction of earthquake consequences in the tasks of population rescue: (theory and practice)] / M.A. SHahraman'yan. – 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. – Moskva: Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut po problemam grazhdanskoy oborony i chrezvychajnyh situacij MCHS Rossii, 2000. – 192 s. – ISBN 5-93970-001-2
- Morozov, V.N. Prognozirovaniye i likvidaciya posledstvij avariynyh vzryvov i zemletryasenij (teoriya i praktika) [Forecasting and elimination of consequences of emergency explosions and earthquakes (theory and practice)] / V.N. Morozov, M.A. SHahraman'yan. – Moskva : URSS, 1998. – 272 s. – ISBN 5-88417-132-3
- Aslanov T.G., Musaeva U.A. Analiz plotnosti raspredeleniya oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryasenija po metodam sfer i ellipsoidov. Vestnik Dagestanского gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2019; 46(2): 61-70. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70
- SHAhtarin, B.I. Opredelenie koordinat ochaga zemletryasenija s ispol'zovaniem figur vtorogo poryadka - ellipsa i giperboly [Determination of the earthquake centre coordinates using second order figures: ellipse and hyperbola] / B.I. SHAhtarin, G.K. Aslanov, T.G. Aslanov // Avtomatizaciya. Sovremennye tekhnologii. – 2018. – T. 72. – № 11. – S. 503-509.
- Aslanov T.G. Opredelenie koordinat ochaga zemletryasenija s ispol'zovaniem kombinirovannogo metoda [Definition of earthquake focus coordinates using a combined method]. Vestnik Dagestanского gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2017;44 (2):118-125. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125
- Aslanov T.G., Magomedov H.D., Musaeva U.A., Tagirov H.YU. Vliyaniye prostranstvennogo raspolozheniya sejsmodatchikov na tochnost' opredeleniya gipocentra zemletryasenija [Influence of the spatial arrangement of seismic detectors on the accuracy of earthquake hypocentre determination]. Vestnik Dagestanского gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016;43 (4):73-84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84

8. Shahtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakaev U.R. Opredelenie koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniem figur chetvertogo i vtorogo poryadka – ovala Cassini i giperboly [Determination of earthquake focus coordinates using the Cassini oval method with second- and fourth-order Hyperbola figures]. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2019; 46 (4): 134-142. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142
9. Rogozhin E.A. Zemletryasenie v Iranе [Earthquake in Iran] [Elektronnyj resurs] // Geografiya. Elektronnyj zhurnal. 2004. № 5. Rezhim dostupa: <http://geo.1september.ru/article.php?ID=200400503> [data obrashcheniya: 24.01.2022]
10. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Musaeva U.A. Anomal'nye oshibki v opredelenii koordinat ochaga zemletryasenij i predlozheniya po ikh ustraneniyu [Anomalous errors in determining focus coordinates earthquakes and suggestions for their elimination]. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2018;45(4): 78-88. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Тагирбек Гайдарбекович Асланов**, кандидат технических наук, генеральный директор, Современные инженерные и информационные технологии, 367006, Махачкала, пгт. Семендер, ул. Кирова, 7, e-mail: tabasik@gmail.com

**Тимур Гаджиевич Айгумов**, кандидат экономических наук, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, Дагестанский государственный технический университет, 367000, Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, e-mail: 915533@mail.ru

**Tagirbek G. Aslanov**, Ph.D. (Eng), General Director, Modern engineering and information technologies, Kirova str., 7, Semender urban-type settlement, Makhachkala, 367006, Russian Federation, e-mail: tabasik@gmail.com

**Timur G. Aygumov**, Ph.D. (Eng), Head of the Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, I. Shamil Ave., 70, Makhachkala, 367000, Russian Federation, e-mail: 915533@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.03.22.

Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2022.

**Научная статья**

УДК 629.7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.020>

## **Информационное обеспечение безопасности полетов на морском транспорте**

С.Н. Павликov<sup>1</sup> psn1953@mail.ru, Е.Ю. Копаева<sup>1</sup> katya.kopaeva.97@mail.ru,  
Ю.Ю. Колесов<sup>1</sup> kolesov\_jr@mail.ru, П.Н. Петров<sup>1</sup> PavelNikol97@gmail.com,

М.А. Гареева<sup>1</sup> zavrtannay6@mail.ru

<sup>1</sup>Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского

**Аннотация** Морские суда и платформы для эффективного решения задач оснащены летательными аппаратами. Эффективность которых во многом зависит от информационного обеспечения по контроля и интеллектуальной поддержки управляемых решений в быстро меняющихся условиях. Среди угроз безопасности полетов выделяются ветровой сдвиг и турбулентные образования. Именно эти угрозы могут быть снижены за счет бортовой аппаратуры по обнаружению и определению параметров движения опасных природных явлений. В работе предлагается новый способ оперативного дистанционного измерения параметров среды, автоматического обнаружения угроз и информационного обеспечения для выработки рекомендаций по уклонению в интересах выполнения поставленной задачи. Целью работы является разработка технологии информационного обеспечения безопасности полетов судовых летательных аппаратов прежде всего самолетного типа. Статья посвящена поиску направлений по совершенствованию информационного обеспечения безопасности полетов судовых беспилотных летательных аппаратов. Актуальность связана с возрастанием масса-габаритных характеристик дронов, изменчивость и возросшим динамическим диапазоном полетных условий. Методы решения поставленных задач основаны на анализе развития и прогнозирования динамики полей скоростей окружающей среды, обнаружения опасных зон. Новизна заключается в построении математической модели мониторинга, выборе сигналов, метода обработки и рекомендаций по применению полученных данных для информационного обеспечения безопасности полета. Основные выводы. Достигнут новый технический результат – повышение вероятности правильного обнаружения опасных зон для беспилотного летательного аппарата и информационного обеспечения управляемых решений по повышению безопасности полетов.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, поле скорости среды, вихревые образования и сдвиг ветра.

**Для цитирования:** Павликов С.Н., Копаева Е.Ю., Колесов Ю.Ю., Петров П.Н., Гареева М.А. Информационное обеспечение безопасности полетов на морском транспорте, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 149—154.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.020>

## **Information support of flight safety in maritime transport**

Sergey N. Pavlikov<sup>1</sup> psn1953@mail.ru, Ekaterina Y. Kopaeva<sup>1</sup> katya.kopaeva.97@mail.ru,

Yuriy Y.Kolesov<sup>1</sup> kolesov\_jr@mail.ru, Pavel .N.Petrov<sup>1</sup>PavelNikol97@gmail.com,

Marina A.Gareeva<sup>1</sup> zavrtannay6@mail.ru

<sup>1</sup>Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelsky

**Abstract:** Sea vessels and platforms for effective problem solving are equipped with aircraft. The effectiveness of which largely depends on information support for control and intellectual support of management decisions in rapidly changing conditions. Among the threats to flight safety, wind shift and turbulent formations stand out. It is these threats that can be reduced by on-board equipment for detecting and determining the parameters of the movement of natural hazards. The paper proposes a new way of operational remote measurement of environmental parameters, automatic detection of threats and development of recommendations for evasion in the interests of performing the task. The purpose of the work is to develop a technology for information support of flight safety of ship aircraft, primarily of aircraft type. The article is devoted to the search for directions to improve the information support of flight safety of ship unmanned aerial vehicles. Relevance is associated with an increase in drone speeds, variability and an increased dynamic range of flight conditions. Methods of solving the tasks are based on the analysis of the development and forecasting of the dynamics of the fields of environmental velocities, the detection of dangerous zones and the development of recommendations for evasion or overcoming them without disturbing the order of the mission. The novelty lies in the construction of a mathematical model of monitoring, the choice of signals, the method of processing and recommendations for the use of the information received for information support of flight safety. A new technical result has been achieved - an increase in the probability of correct detection of dangerous areas for an unmanned aerial vehicle and intellectual support for a management decision.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, medium velocity field, vortex formations and wind shear.

**For citation:** Pavlikov S.N., Kopaeva E.Yu., Kolesov Yu.Yu., Petrov P.N., Gareeva M.A. Information support of flight safety in maritime transport, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 149—154.

## Введение

Морские интеллектуальные системы для эффективного решения задач оснащены летательными аппаратами. Эффективность которых во многом зависит от информационного обеспечения по контролю среды для обоснованных управлеченческих решений в быстро меняющихся условиях. Среди угроз безопасности полетов выделяют группу: ветровой сдвиг и вихревые образования природного и техногенного характера. Именно эти две угрозы могут быть снижены за счет бортовой аппаратуры по обнаружению и определению параметров движения опасных природных явлений. В работе предлагается метод оперативного дистанционного измерения параметров среды, автоматического обнаружения угроз и их параметров для выработки рекомендаций по изменению курса, высоты и скорости при соблюдении условий выполнения миссии. Объектом является система информационного обеспечения безопасности полетов беспилотников, эксплуатируемых с судна. Предметом - разработка технологии информационного обеспечения безопасности полетов судовых летательных аппаратов прежде всего самолетного типа. Именно безопасность последних в большей степени зависит от интенсивности поля ветра в районе взлетно-посадочной полосы (ВПП) судна, а также на границе зоны уверенной связи и наблюдения судового оборудования. При посадке могут быть использованы кроме бортовой аппаратуры (БА) и судовые системы, однако интенсивность динамики условий требует возложить ответственность прежде всего на бортовую аппаратуру, а в дали от судна информационное обеспечение полностью зависит от БА. Целью работы является разработка технологий по повышению вероятности правильного обнаружения и оценки степени опасности природных явлений на трассе движения судовых беспилотных летательных аппаратов (СБЛА) путем совершенствования локационного информационного обеспечения безопасности полетов (ИОБП). Актуальность связана с возрастанием массогабаритных характеристик СБЛА, изменчивость и возросший динамический диапазон полетных условий, под которыми понимаются поле скорости и ускорения воздушных потоков на трассе движения СБЛА. Методы решения поставленных задач основаны на анализе развития технологий и прогнозировании динамики полей скоростей окружающей среды, метода дистанционного оперативного обнаружения опасных зон и выработки рекомендаций по уклонению или преодолению их не нарушая порядок выполнение поставленной перед СБЛА миссии. Новизна заключается в построении математической модели мониторинга, выборе сигналов, метода обработки и рекомендаций по применению полученной информации для обеспечения безопасности полета.

Основные выводы: Достигнут новый востребованный результат – повышение вероятности правильного обнаружения опасных зон и их параметров для управлеченческих решений СБЛА. Судовые морские интеллектуальные системы содержат технологии добычи информации, алгоритмы подготовки управлеченческих решений. Критерии эффективности

информационного обеспечения принятая вероятность правильного обнаружения опасных явлений при заданной вероятности ложной тревоги [1-3]. Анализ технологий показал недостаточное использование классификационных признаков локационного обнаружения таких явлений для СБЛА в автономном режиме полета [3]. К таким классификационным параметрам относятся величина расширения спектра отраженных сигналов и (или) динамика интервала раскорреляции в пространственно-временном континууме [4-5]. Развитие технологий основано на удовлетворении возрастающих потребностей пользователей на морском транспорте и могут быть использованы для аналогичных задач при организации воздушного движения.

Анализ наземных, судовых средств и БА мониторинга пространства для обнаружения указанных явлений приведен в [1, 5, 6]. Требования к технологиям информационного обеспечения безопасности СБЛА приведены в табл. 1.

Для реализации указанных требований для БА СБЛА предлагается использовать параметры и процессы их формирования [3 - 5]:

- поле скорости среды и их производные по плоскостям с определением зоны контрастного изменения поля скорости;
- зоны аномалий турбулентности;
- параметры, структура и характеристики аномалий поля скорости вблизи траектории
- устойчивость движения СБЛА;
- время упреждения контрольной точки маршрута, совпадающей с одной из опасных зон;
- рекомендации изменений параметров движения с целью уклонения от угроз;
- рекомендации по изменению технологии мониторинга и измерения параметров опасных зон турбулентности;
- рекомендации по изменению технологии мониторинга и измерения параметров опасных зон поля скорости движения среды;
- документирование на СБЛА и при наличии устойчивой связи передача информации на судно.

Таблица 1

### Требования и критерии к БА

п./п	Критерий	Показатель
1	Вероятность обнаружения и распознавания опасных явлений	Не менее 0,9
2	Дальность обнаружения	Более n100 м
3	Время выработки управлеченческого решения	Не более 1 с
4	Признак обнаружения турбулентности при наличии одной из компонентов векторов в пределах 1 м/с	Изменение спектра отраженного сигнала
3	Признак обнаружения изменения сдвига ветра до 1 м/с	Изменение интервала раскорреляции отраженного сигнала

### 1. Метод определения зон турбулентности

Метод мониторинга и определения зон турбулентности (ЗТ) основан на способе измерения дальности и скорости объекта за один цикл излучения/приема [7], принцип работы которого приведен на рисунке 1.

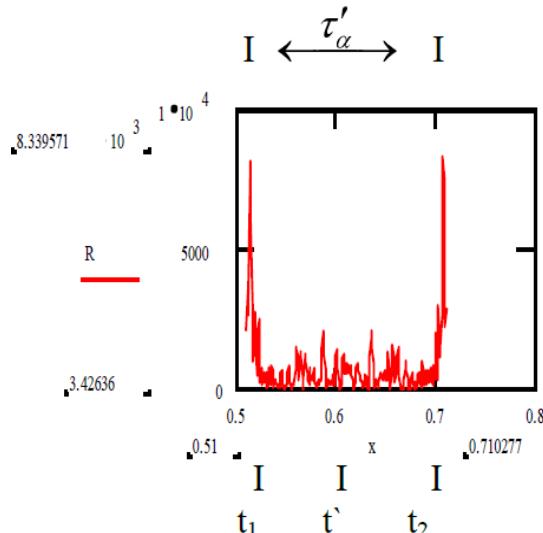


Рис.1 Отклик согласованного фильтра [7]

На временной диаграмме (рис. 1.) моменты времени составляют:

$t_1$  – соответствует местоположению первого максимума;  $t_2$  – соответствует местоположению второго максимума;  $\tau'$  – соответствует истинной дальности до ЗТ; корреляционный отклик, имеющий два максимума, а временной интервал между ними составляет

$$\tau'_{\alpha} = -2\tau_{\alpha} = \frac{4V\tau}{C}.$$

Следовательно, возможно измерить радиальную относительную скорость ЗТ на основании следующего выражения:

$$V = \frac{\tau'_{\alpha} C}{4\tau}.$$

Рисунок 1 Отклик совместного измерения дальности до ЗТ и скорости её перемещения

Дальность до ЗТ и скорость её перемещения могут быть определены согласно формул [7]:

$$D = \frac{C(t_1 + t_2)}{4}; \quad (1)$$

$$V = \frac{C(t_2 - t_1)}{4\tau}. \quad (2)$$

Сформированное поле турбулентности по ячейкам пространства с цветовой подсветкой величины скорости ЗТ в реальном масштабе времени наносится на электронную карту.

### 2. Методы формирования поля скорости среды

Метод формирования поля скорости среды по элементам дальности в горизонтальной и вертикальной плоскостях основан на измерении коэффициента корреляции по слоям формируемой модели среды. Метод состоит из следующих операций:

- планируют зоны локации параметрами диапазон наклонных дальностей, угол наклона, ширина характеристики направленности;
- в среду через равные промежутки времени излучают импульсы с узкой диаграммой направленностью под углом к горизонту;
- записывают отраженный сигнал;
- определяют составляющую скорости движения среды в плоскости локирования;
- по максимуму взаимно корреляционной функции двух разрезов амплитуд отраженных сигналов с разных дальностей локирования;
- вычисление скорости ветра по методу [8] и построение полей скорости ветра выше и ниже высоты полета СБЛА.

Сформированное объемное поле скорости привязывается к электронной карте местности в реальном масштабе времени

В роли второго метода построения поля скорости предложено модернизированный вариант метода определения поля турбулентности. При этом накопленные данные позволяют сформировать потоки в динамике, что позволяет видеть мгновенные значения и процессы тренда перетекания параметров по пространству электронной карты.

### 3. Совместное формирование опасных зон и рекомендаций по их преодолению

Сформированные поля скорости и турбулентности с параметрами её интенсивности в реальном масштабе времени накладываются на электронную карту местности. Возможность применения двух методов из трех позволяет очистить массивы от ошибочных значений, что повышает надежность полученного результата. Выбор методов и оптимизация находятся на этапе проверки.

На эту же карту накладывается маршрут движения СБЛА. Анализ полученной информации позволяет определить варианты маршрутов и принять один за основной, продолжая контролировать текущее изменение опасных зон [9]. С учетом сказанного предлагается структура радиоэлектронного комплекса СБЛА, приведенная на рисунке 2.

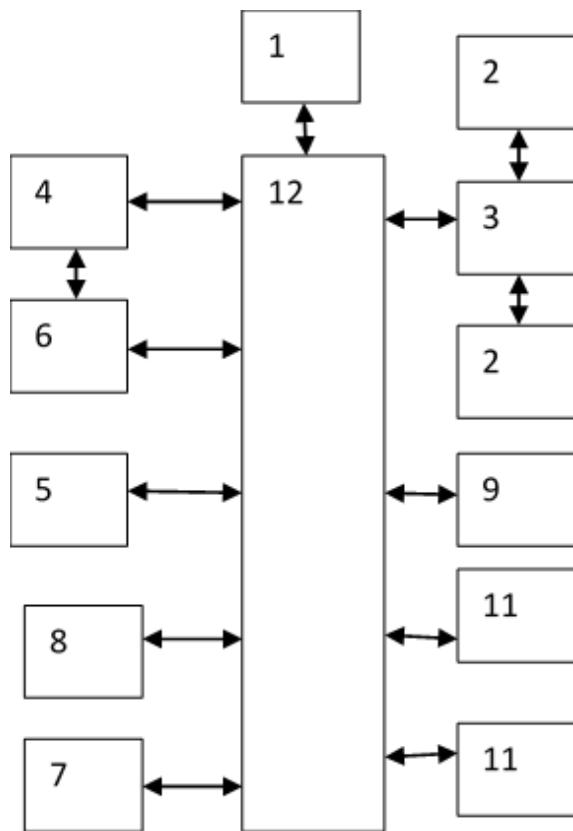


Рис. 2 Структура радиоэлектронного комплекса СБЛА

В состав включены: 1 – блок управления; 2 – радиолокаторы с антеннами; 3 – блок коммутации; 4 - блок измерения поля скорости среды; 5 – первый блок измерения зон турбулентности; 6 - второй блок измерения зон турбулентности; 7 – блок спутниковой навигации; 8 – блок цифровой карты; 9 – блок комплексной обработки; 10 - блок радиосвязи с антеннами; 11 – блок электропитания; 12 – информационная шина. На рисунке 3 приведена блок-схема алгоритма, где обозначены:

- 1 – Ввод исходных данных;
2. Сбор информации о координатах и привязка к электронной карте;
3. – Навигационное обеспечение;
4. – Построение траектории движения на электронной карте;
5. – Мониторинг окружающего пространства, определение границ участков упреждения;
6. – Выбор не менее двух методов определения опасных зон повышенного сдвига ветра и вихревого образования;
7. – База данных;
8. – Реализации методов мониторинга пространства на предмет обнаружения опасных зон и измерения их параметров;
9. – Комплексная обработка и принятие решения по правилу «2 из 3»;
10. - Выработка вариантов решения по

изменению методов мониторинга;  
11. – Выбор трассы;

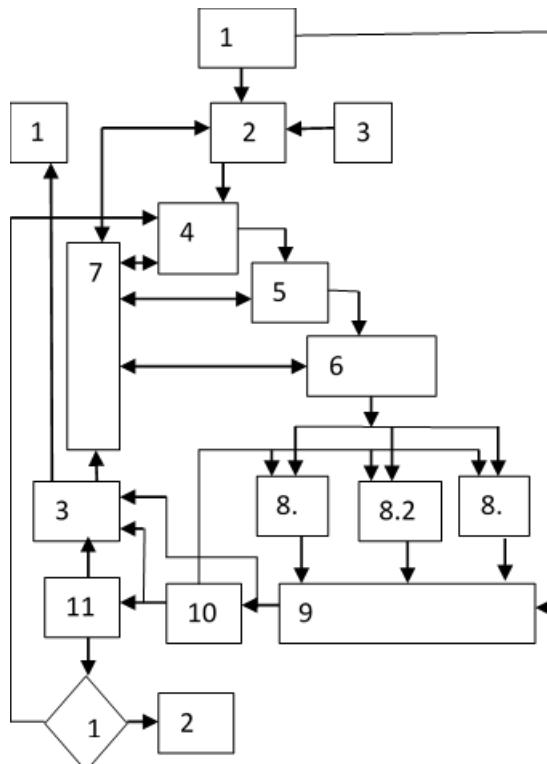


Рис. 3 Блок-схема алгоритма

12. – Проверка условия: задача завершена?
13. – Обновление базы данных;
14. – Отправка сообщения о результатах выполнения задания.

Таким образом, на рассмотренном варианте реализации описанного технического решения доказана реализуемость технологии. Работоспособность отдельно рассмотренных методов приведена в работах [5 - 9].

### Заключение

Внедрение предложенной совокупности технологических решений, направленных на достижение единой цели - повысить вероятность обнаружения опасных зон по двум классификационным признакам тремя методами, результаты которых наносятся с привязкой к электронной карте, в районе маршрута движения СБЛА. Повышенная точность измерения параметров полей ветра и зон повышенной турбулентности обеспечивает обоснованное принятие решения на уклонение или изменение трассы движения применительно к заданным требованиям конкретного образца СБЛА, решаемой задачи и условий мониторинга. Достигнут результат повышения точности оценки параметров при соотношении сигнал/помеха от 0,6 и выше при выполнении требований таблицы 1.

### Литература

- 1 Системы обеспечения вихревой безопасности полетов летательных аппаратов. /В.И. Бабкин, А.С. Белоцерковский, Л.И.Турчак и др.; отв. ред. Л.И.Турчак; ВЦ им. А.А. Дородницына РАН – М.: Наука 2008. - 373с.
- 2 Пат. РФ № 2477893 Способ обеспечения вихревой безопасности полета летательного аппарата./ Фальков Э.Я. и др. Заявл. 30.09.2011, Опубл. 20.03.2013.
- 3 М.В.Черняков, Г.В. Столяров Перспективы развития АСУ полетами, навигации, посадки и связи государственной авиации // Научный вестник МГТУ ГА Серия Радиофизика и радиотехника. 2010. №152. С. 72 – 79.
- 4 Мочалов А.В. Новые направления в развитии телекоммуникационных систем: монография /А.В. Мочалов, С.Н. Павликова, Е.И. Убанкин. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2016. – 116с.
- 5 Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация.: – М.: Радио и связь. 1993 – 416 с.
- 6 Павликова С.Н. Убанкин Е.И., Черновол М.Ю., Зимарёва Е.А.Изменение структуры автоматизированной системы управления организацией воздушного движения в аэропорту // Наукометрические технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т.12. №5. С.36 – 45.
- 7 Павликова С.Н. Убанкин Е.И. Метод совместного измерения дальности и радиальной скорости// Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т.8. №4. С.18 – 21.
- 8 А.С. СССР, №1296943. Способ гидролокационного измерения профиля скорости течения водного бассейна./ Стефанов С.Р., Савгов В.И. и Виноградская Н.П. Заявл. 16.04.1985. Опубл. 15.03.1987. Бюл.№10.
- 9 Пат. РФ № 2758626 Способ предупреждения попадания летательного аппарата в вихревой след самолета – генератора вихрей./ Павликова С.Н., Убанкин Е.И., Зимарёва Е.А. и др. Заявл. 28.12.2020, Опубл. 29.10.2021. Бюл. № 31.

### References

1. Systems for ensuring vortex safety of aircraft flights. /V.I. Babkin, A.S. Belotserkovsky, L.I. Turchak and others; Holes. ed. L.I.Turchak; VC im. A.A. Dorodnitsyn RAS – M.: Nauka 2008. -373 p. (In Rus)
2. Pat. RF No 2477893 Method of ensuring the vortex safety of the flight of the aircraft./ Falkov E.Y. et al. Zyavl. 30.09.2011, Publ. 20.03.2013. (In Rus)
3. M.V.Chernyakov, G.V. Stolyarov Prospects for the development of ACS flights, navigation, landing and communication of state aviation / Scientific Bulletin of MSTU GA Series Radiophysics and Radio Engineering. 2010. №152. Pp. 72 – 79. (In Rus)
4. Mochalov A.V. New directions in the development of telecommunications systems: monograph / A.V. Mochalov, S.N. Pavlikov, E.I. Ubankin. Vladivostok: VSUES. 2016. – 116p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008475605>, date of access 09.03.2021. (In Rus) (In Rus)
5. Chernyak V.S. Multipositional radar.: – M.: Radio and communication. 1993 – 416 p. (In Rus)
6. Pavlikov S.N. Ubankin E.I., Chornovol M.Yu., Zimarineva E.A. Changing the structure of the automated air traffic management system at the airport / High-tech technologies in space research of the Earth. 2020. T.12. №5. Pp. 36 – 45. (In Rus)
7. Pavlikov S.N. Ubankin E.I. Method of joint measurement of range and radial velocity./ Telecommunications and transport. 2014. T.8. №4. Pp. 18 – 21. (In Rus)
8. A.S. USSR, No1296943. Method of sonar measurement of the flow velocity profile of the water basin./ Stefanov S.R., Savgov V.I. and Vinogradskaya N.P. Zayavl. 16.04.1985. Publ. 15.03.1987. Bil.No10. (In Rus).
9. Pat. RF No 2758526. Method of preventing the aircraft from entering the vortex trail of the aircraft - the generator of vortices./ Pavlikov S.N., Ubankin E.I., Zimarineva E.A. and others Zayavl. 28.12.2020, Publ. 29.10.2021. Bil. № 31. (In Rus)

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сергей Николаевич Павликов**, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая , 50а, e-mail: psn1953@mail.ru.

**Sergej N. Pavlikov**, Ph.D. (Eng), Professor, Professor of the Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russian Federation, e-mail: psn1953@mail.ru.

**Екатерина Юрьевна Копаева**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая,50а, e-mail: katya.kopaeva.97@mail.ru.

**Ekaterina Y. Kopayeva**, graduate student of the Department of Radio Electronics and Radio Communication Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russian Federation, e-mail: katya.kopaeva.97@mail.ru.

**Юрий Юрьевич Колесов**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая , 50а, e-mail: kolesov\_jr@mail.ru.

**Yuriy Y. Kolesov**, graduate student of the Department of Radio Electronics and Radio Communication Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russian Federation, e-mail: kolesov\_jr@mail.ru.

**Павел Николаевич Павлов**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: PavelNikol97@gmail.com,

**Pavel N. Pavlov** graduate student of the Department of Radio Electronics and Radio Communication Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russian Federation,, e-mail: PavelNikol97@gmail.com,

**Марина Анатольевна Гареева**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая , 50а, e-mail: zavrtannay6@mail.ru

**Marina A. Gareeva** graduate student of the Department of Radio Electronics and Radio Communication Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russian Federation, e-mail: zavrtannay6@mail.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.12.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.03.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2022.

**Научная статья**

УДК 629.5:621.039

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.021>

## **Системное исследование процессов теплообмена в условиях принудительной и естественной циркуляции при внешнем динамическом воздействии**

А.А. Сатаев<sup>1</sup> [sancho\\_3685@mail.ru](mailto:sancho_3685@mail.ru), А.М. Самойлов<sup>1</sup> [samoilov15.03.1999@mail.ru](mailto:samoilov15.03.1999@mail.ru),

А.А. Блохин<sup>1</sup> [blokhin-2016@list.ru](mailto:blokhin-2016@list.ru), В.В. Андреев<sup>1</sup> [vyach.andreev@mail.ru](mailto:vyach.andreev@mail.ru)

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация** Целью настоящей работы является системное исследование теплогидравлических процессов в гидравлическом тракте ядерного реактора с учетом влияния внешних динамических сил (качка, крен), присущих судовой ЯЭУ. Проведено экспериментальное исследование процессов неизотермического перемешивания и естественной циркуляции в одной и двух плоскостях колебаний. В качестве основного метода исследования были использованы экспериментальные методы (метод температурного зондирования), а также методы визуализации и системного анализа. Результатом применения такого системного подхода стала классификация задач, генерация новой системы, соотнесение и разграничение систем, ее составляющих, а также закономерности их функционирования, необходимость целенаправленного воздействия на введенную систему, а также новые системные связи. Показано, что система проточного тракта судовой ядерной энергетической установки является сложной нестационарной системой. Было получено, что действие статического крена и качки в одной плоскости оказывается сильнее и вызывает большие температурные градиенты вдоль области смешения потоков. В результате исследования процессов естественной циркуляции было получено, что качка в одной плоскости вызывает снижение массового расхода, что может негативно сказаться на теплотехнической надежности активной зоны.

**Ключевые слова:** динамическое воздействие, качка, теплогидравлические процессы, естественная циркуляция, судовая ядерная энергетическая установка, смешение неизотермических потоков, колебания, системные связи.

**Для цитирования:** Сатаев А.А., Самойлов А.М., Блохин А.А., Андреев В.В Системное исследование процессов теплообмена в условиях принудительной и естественной циркуляции при внешнем динамическом воздействии, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 155—161.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.021>

## **System research of heat exchange processes under forced and natural circulation under external dynamic impact**

Aleksandr A. Sataev<sup>1</sup> [sancho\\_3685@mail.ru](mailto:sancho_3685@mail.ru), Aleksandr M. Samoilov<sup>1</sup> [samoilov15.03.1999@mail.ru](mailto:samoilov15.03.1999@mail.ru),

Alexei A. Blokhin<sup>1</sup> [blokhin-2016@list.ru](mailto:blokhin-2016@list.ru), Vyacheslav V. Andreev<sup>1</sup> [vyach.andreev@mail.ru](mailto:vyach.andreev@mail.ru)

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russian Federation

**Abstract.** The purpose of this work is a systematic study of thermohydraulic processes in the hydraulic path of a nuclear reactor, taking into account the influence of external dynamic forces (pitching, roll) inherent in the ship's nuclear power plant. An experimental study of the processes of non-isothermal mixing and natural circulation in one and two planes of oscillations has been carried out. Experimental methods (the method of temperature sensing), as well as visualization and system analysis methods were used as the main research method. The result of applying such a systematic approach was the classification of tasks, the generation of a new system, the correlation and differentiation of the systems that make up it, as well as the patterns of their functioning, the need for targeted impact on the introduced system, as well as new system connections. It is shown that the flow path system of a ship's nuclear power plant is a complex non-stationary system. It was found that the effect of static roll and pitching in the same plane has a stronger effect and causes large temperature gradients along the flow mixing region. As a result of the study of natural circulation processes, it was found that pitching in one plane causes a decrease in mass flow, which can negatively affect the thermal reliability of the active zone.

**Key words:** dynamic influence, pitching, thermohydraulic processes, natural circulation, ship nuclear power plant, mixing of non-isothermal flows, fluctuations, system connections.

**For citation:** Aleksandr A. Sataev, Aleksandr M. Samoilov, Alexei A. Blokhin, Vyacheslav V. Andreev, System research of heat exchange processes under forced and natural circulation under external dynamic impact, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 155—161.

### **Введение**

Повышение функциональности, безопасности, экономичности сложных технических систем является повсеместной тенденцией на сегодняшний

день. Применение системного подхода, базирующегося на аппарате математического, экспериментального, имитационного моделирования позволяет рассматривать такие системы комплексно,

учитывая все возможные связи между элементами, а также получая надсистемные свойства, которые позволяют провести всесторонний анализ всех процессов и явлений [1].

Конкретные задачи анализа могут состоять в выявлении причинно-следственных связей в системе; установлении закономерностей ее функционирования и придания им математической формы; наконец, в определении влияния изменений параметров системы на его поведение. Соответственно анализ должен объяснить прошлое системы и определить ее настоящее. Исходя из этого методы анализа могут использоваться и для специфических задач прогнозирования [2].

В связи с развитием навигации по Северному морскому пути и ее переход на круглогодичный режим работы строятся новейшие атомные ледоколы проекта 22220 «Арктика», а также перспективный атомный ледокол проекта 10510 «Лидер». Для обоснования такого режима работы необходим всесторонний (многофакторный) анализ всех процессов, происходящих на судне [3], а особенно в реакторной установке. Данная статья обобщает методологию и экспериментальные подходы по исследованию процессов неизотермического смешения и естественной циркуляции при внешнем динамическом воздействии, которые проводятся коллективом авторов с 2018 года по настоящее время.

### Описание новой системы

Система проточного тракта судовой ядерной энергетической установки является сложной нестационарной системой. В самом общем виде любую теплогидравлическую систему можно задать системой уравнений, в которую входят: система уравнений движения Навье-Стокса, дифференциальное уравнение сохранения энергии, дифференциальное уравнение сохранения вещества (сплошности). Решение данных уравнений – сложная задача и ограничена простыми случаями, поэтому при исследовании конвективного переноса в основном применяется теория подобия. Также в терминах описания сложной системы можно

рассматривать влияние внешних сил на теплогидравлические процессы.

Действие этих внешних сил выражается в виде периодической качки, статического крена [4], которое также необходимо учитывать при проектировании современных судовых реакторных установок.

Моделирование сложных штормовых условий возможно с помощью проведения физических экспериментов или с помощью компьютерных вычислительных экспериментов на основе нелинейных численных и имитационных моделей [5].

Анализ процессов возможен на основе теории катастроф [6]. Морское волнение, как правило, имеет нерегулярный характер и различную интенсивность в каждом конкретном случае, зависящую от многих факторов. Исходя из этого, можно задать новую систему, которая находится на стыке этих двух систем.

Системные свойства формируются с помощью выявления, сохранения, усиления и проявления одних свойств частей системы с одновременным ослаблением, нивелированием и скрытием других при взаимодействии частей этой системы.

На определенном уровне взаимодействия происходит скачок (переход количества в качество) — появление у совокупности взаимодействующих объектов новых свойств, не присущих этим объектам по отдельности.

Наличие у системы таких свойств говорит нам о том, что, во-первых, система не сводится к простому набору объектов и, во-вторых, декомпозиция системы на отдельные части и исследуя их, нельзя узнать все свойства системы.

На рисунке 1 схематично показано соотношение описанных систем и их взаимодействие. Новая система получается при объединении систем теплогидравлики ЯЭУ и системы влияния качек и наклонов на нее. Отдельно показано, что входными параметрами системы влияния качек и наклонов является волновой спектр определенного района плавания, также отмечено, что методикой описания данной системы можно описывать и другие факторы-системы (вибрации, аварийные ситуации).

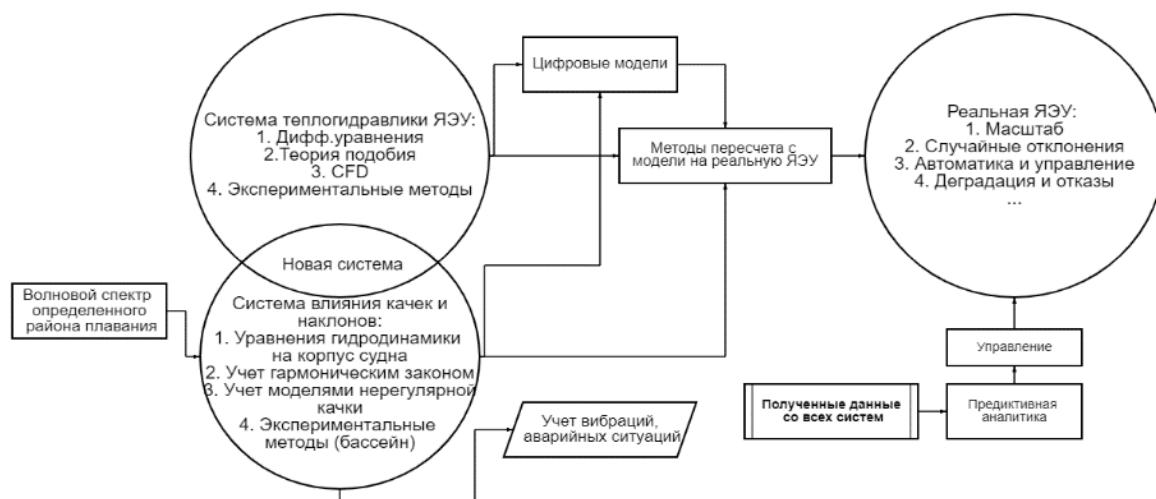


Рис. 1 Блок-схема методики исследования теплогидравлических процессов при воздействии внешних динамических сил

Все эти системы можно представить и задать в виде математических аналогов – цифровых моделей. Эти модели уже активно используются при создании цифровых двойников сложных инженерных объектов [7], [8]. Однако, требуется обязательное согласование с реальной ЯЭУ, которое осуществляется с помощью определенных методов пересчета с моделей на реальную ЯЭУ, а также с данными, полученными на энергоблоке в процессе его эксплуатации (для этих задач были созданы и функционирую Центры обработки данных рядом с действующими АЭС, которые ведут запись многочисленных данных, получаемых с реального энергоблока), используя данную информацию можно

спрогнозировать поведение энергоблока уже в будущем (предиктивная аналитика).

Стоит отметить, что реальная энергоустановка отличается кроме масштаба, еще и наличием возможных случайных отклонений, деградации и отказов, а также сложной системой управления и автоматики.

Так как прямое численное моделирование и решение системы дифференциальных уравнений, описывающих функцию системы, является очень сложной задачей, а также то, что нет однозначного способа учета влияния качек и наклонов на теплофизические параметры, эти вопросы требуют уточнения на экспериментальных моделях.

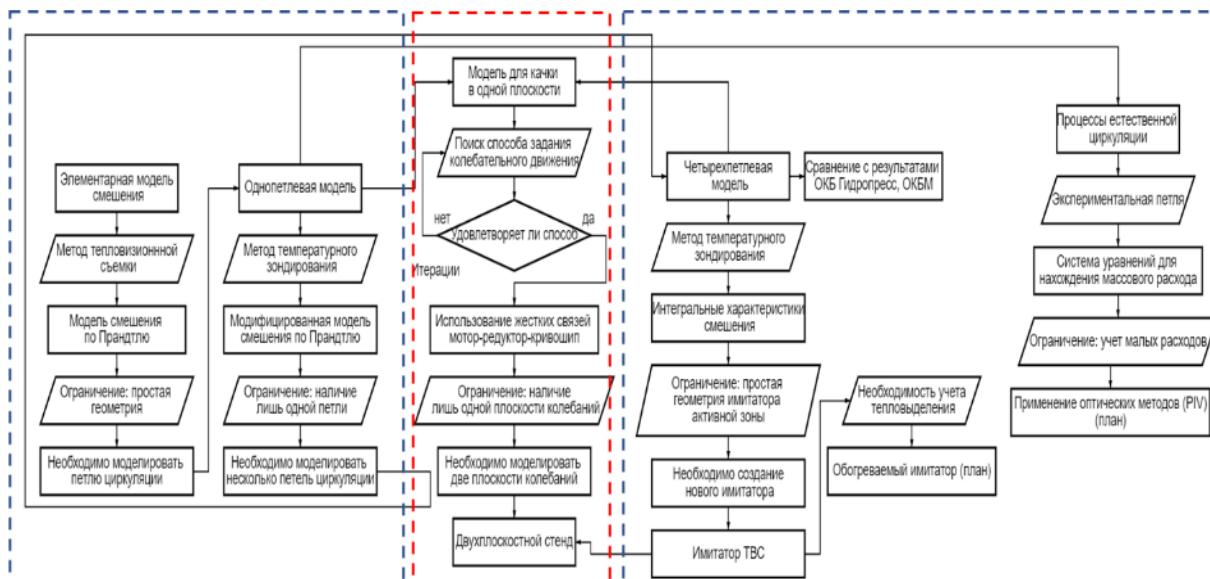


Рис. 2 Блок-схема экспериментального моделирования процессов неизотермического перемешивания

## Экспериментальное исследование системных связей

Системный анализ – итеративный процесс, состоящий из оценки альтернативных решений, полученных в процессе синтеза системы.

В период с 2018 года по настоящее время на базе «Лабораторного комплекса экспериментальных теплофизических стендов» кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» в ходе исследований процессов перемешивания неизотермических потоков, были изготовлены, испытаны, исследованы несколько модификаций экспериментальных стендов.

Генезис моделей происходил от простейших (элементарных) моделей к более сложным и приближенным к геометрии проточной части судовых ядерных реакторов. Была проведена полная процедура [9] по построению модели как отдельно по теплогидравлике (элементарный объем, однопетлевая модель [10], четырехпетлевая модель [11]), так и по учету воздействия качки на теплогидравлические процессы (однoplоскостной и двухплоскостной стенд (бортовая/килевая качка и их совместное действие).

На первом этапе работы была предложена элементарная модель смешения, представляющая собой кювету смешения. В которую производился впрыск в виде импактной (затопленной) струи.

Стенка модели была выполнена металлической и тонкостенной для ее исследования с помощью тепловизионной съемки. Основным ограничением модели является ее простота. Однако, данные исследования позволили в дальнейшем уточнить постановку задачи и определить ключевые факторы, влияющие на процессы неизотермического смешения (такие как расходы, температуры, гидравлическое сопротивление, геометрия).

На втором этапе была спроектирована и испытана однопетлевая модель, где основным методом исследования являлся контактный метод температурного зондирования областей смешения неизотермических потоков.

Следующим этапом стало создание экспериментальной модели состоящей из 4 петель циркуляции. Данные исследования необходимы для оценки процессов неизотермического перемешивания при парциальном режиме работы (когда одна/несколько петель циркуляции отключены). И основной областью для исследования в данной работе являлся опускной кольцевой участок.

Все петлевые модели были испытаны при воздействии на них внешних динамических сил в виде периодической качки в одной плоскости и статического крена. Так как режимы качки и статического крена оказывают существенное влияние на процессы естественной циркуляции

теплоносителя было создано отдельное направление исследований данной тематики [12].

Классификация задач для экспериментального исследования теплогидравлических процессов при воздействии внешних динамических сил представлена на рисунке 3. Отдельно были выделены категории: по характеру циркуляции (принудительная (осуществляется за счет насосного оборудования) и естественная (за счет разности плотностей)), по характеру задачи – статика и динамика, статический режим отдельно подразделяется по наличию крена, а динамика по количеству моделируемых плоскостей качки (1 или 2).

Для инициирования колебаний в двух плоскостях был разработан и изготовлен экспериментальный стенд уникальной конструкции [13] и особой прецизионной системой отслеживания колебаний с помощью энкодера и акселерометрагироскопа. Также необходимо учитывать возможную асимметрию цикла колебаний (когда есть разность фаз и начальный угол отклонения). Кроме того, важнейшим параметром описания колебательного процесса является период колебаний.

### Экспериментальное исследование влияния внешних динамических сил на процессы естественной циркуляции

В ходе исследований было получено, что внешняя динамическая сила имеет большее воздействие на потоки с низкими скоростями и близкими к скорости естественной циркуляции. Естественная циркуляция – это естественный физический процесс возникновения движущего напора среды в замкнутом контуре за счёт разности весов теплоносителя в опускной и подъёмной ветвях контура циркуляции. Основными условиями существования установившегося режима ЕЦ являются: уменьшение плотности теплоносителя при его подогреве (либо за счёт термического расширения, либо за счёт кипения); расположение источника подвода тепла ниже теплообменника, охлаждающего теплоноситель.

Для исследования процессов развития и устойчивости естественной циркуляции теплоносителя был разработан стенд, который представляет собой замкнутый петлевой контур, моделирующий одну из петель циркуляции теплоносителя реальной судовой ядерной энергетической установки.

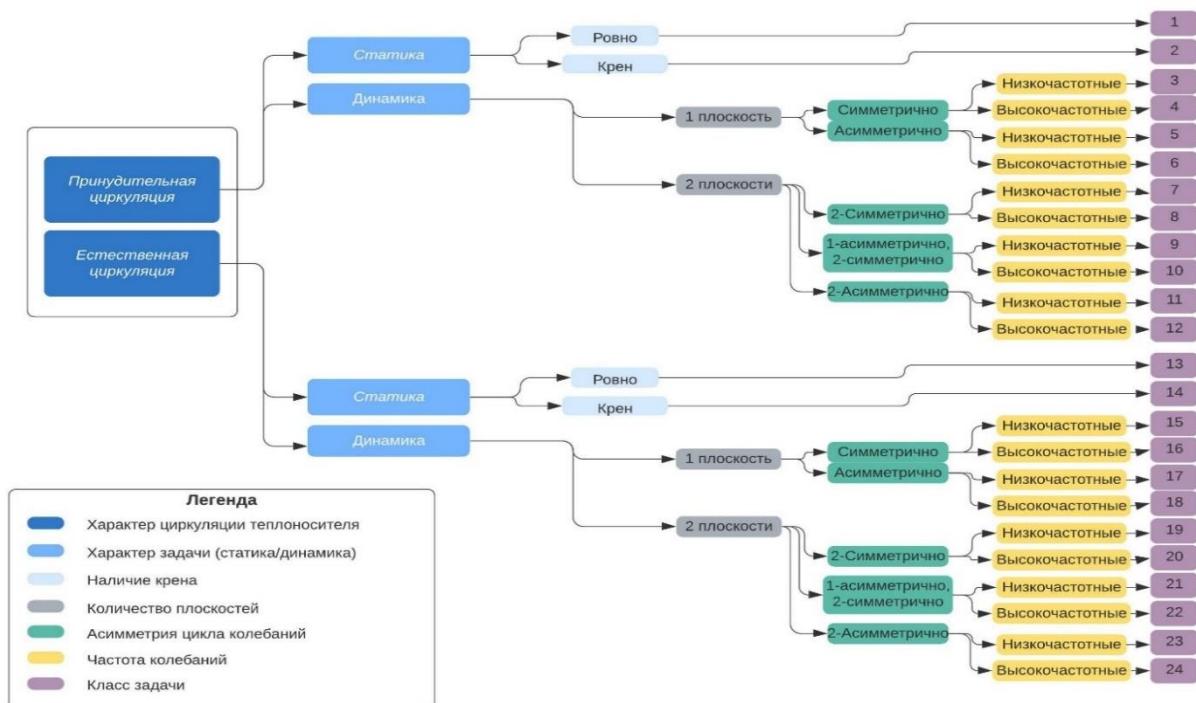


Рис. 3 Классификация задач для экспериментального исследования на модели системы

Специфика исследований заключается в анализе процесса естественной циркуляции при динамических режимах (аналогичных судовой качке), а именно при статическом крене и гармонических колебаниях

Одним из ключевых параметров, которым можно оценить степень развития и устойчивости при ЕЦ, является расход среды (массовый, объёмный, скоростной и т.д.). Основное влияние на расход среды в случае судовых установок оказывает качка.

При динамических режимах (качке) изменяется нивелирный напор. Для случая гармонических колебаний его изменение может быть выражено следующим соотношением:

$$h(t) = h_{\max} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (1)$$

где  $h$  – высота, [м];  $h_{\max}$  – амплитуда, [м];  $T$  – период колебаний, [с];  $t$  – текущее время, [с].

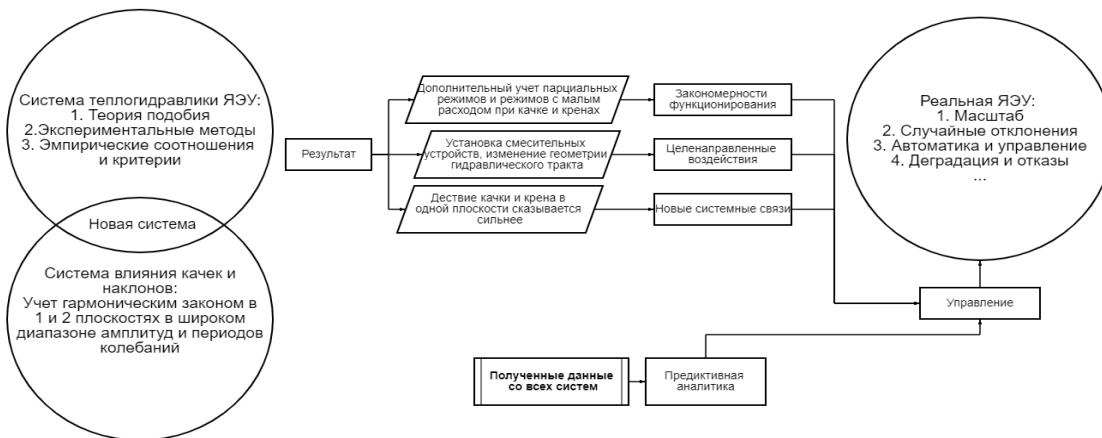


Рис. 4 Результат системного подхода к рассмотрению системы учета влияния качки на теплогидравлические процессы

### Результаты работы и их обсуждение

Для оценки степени влияния изменения характера задачи на интегральные характеристики процесса смешения неизотермических потоков была проведена серия экспериментов для различных типов задач. В качестве критерия оценки степени влияния изменения пространственной ориентации модели был предложен относительный критерий степени неизотермичности по высоте:

$$\gamma_z = \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} - t^* \right)}{t^*} \times 100\% \quad (2)$$

где  $\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$  – средняя температура вдоль вертикальной оси по опускному зазору, расположенной непосредственно под входным патрубком, [°C]; n – число точек (координат) измерений;  $t^*$  – температура эталонного перемешивания, [°C], которую в рамках представленных результатов принимали как среднюю температуру между начальными входными температурами горячего (60°C) и холодного потоков (20°C), равную 40 °C. В таблице 1 представлены некоторые из классов задач согласно рисунку 3.

Таблица 1  
Сравнение режимов

Тип задачи	Класс задачи	Средняя температура вдоль оси смешения	Степень неизотермичности в %
Статика	1	41,76	4,4
Крен	2	29,76	25,6
Качка большой период	3	44,42	11,05
Качка малый период	4	46,26	15,65
Качка 2 плоскости	8	40,04	0,1

Из полученных результатов видно, что наибольшее влияние на процессы неизотермического перемешивания оказывают статический крен и качка в одной плоскости. Это объясняется тем, что происходит сильная концентрация горячего/холодного потока относительно одной из стенок модели, вызывая в этой области локальный максимум/минимум.

При воздействии на модель качки в двух плоскостях наблюдается несколько иная картина. Нет четкой и однозначной зависимости нахождения областей с высокой/низкой температурой от положения модели в пространстве (по крайней мере для колебаний с низкой амплитудой). Кроме того, заметно, что практически отсутствуют большие области неравномерности и амплитуда пульсаций параметров температуры ниже, чем при качке в одной плоскости, что подтверждается близким к эталонному показателю степени неизотермичности по высоте.

Для процессов естественной циркуляции были проведены серии экспериментальных работ как на статическом режиме работы, так и на динамическом, для возможности сравнения результатов при аналогичных начальных параметрах (расходе охлаждающей воды и поданной мощности). Как и предполагалось, имело место снижение расхода среды, что косвенно подтверждалось повышением температуры в характерных точках трассы циркуляции (аналогичные выводы следуют так же из теплового баланса).

Снижение расхода составило приблизительно 10% в сравнении со статическим режимом работы (класс задачи 13). При угле колебаний порядка 15 градусов (класс задачи 16) такое изменение расхода коррелирует с изменением нивелирного напора. Так же прослеживались флюктуации температуры, что свидетельствует о флюктуации расхода среды, период колебания температуры приблизительно равнялся удвоенному периоду колебания стенда, что свидетельствует о наличии инертности внутри контура.

### Заключение

Исходя из областей неравномерности, учет нерегулярного волнения с помощью простой

системы в виде колебаний в одной плоскости может давать неточную оценку. Следовательно, необходимо тщательно подходить к вопросу моделирования, а также выбору системы и ее входных параметров.

Результатом применения системного анализа к исследованию теплогидравлических процессов в судовой ЯЭУ при воздействии внешних динамических сил стали определенные рекомендации, связанные с необходимостью дополнительного учета парциальных режимов и режимов с малыми расходами (ЕЦ), а также

необходимости конструкторской проработки циркуляционного тракта (установка смесительных устройств и изменение геометрии гидравлического тракта). Также было получено, что действие статического крена и качки в одной плоскости оказывается сильнее и вызывает большие температурные градиенты вдоль области смешения потоков. В результате исследования процессов естественной циркуляции было получено, что качка в одной плоскости вызывает снижение массового расхода, что может негативно сказаться на теплотехнической надежности активной зоны.

### Литература

- Скороходов, Д. А. Основные принципы системных исследований судна на подводных крыльях / Д. А. Скороходов, Ю. Е. Крылов, А. Л. Стариченков // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 1-1(51). – С. 118-125. – DOI 10.37220/MIT.2021.51.1.017.
- Целемецкий В.А. Основы технической системологии. Т. 2. // СПб. Высшее военно-морское инженерное училище, 1996.
- Определение необходимой мощности при движении ледокола "Лидер" в штормовых условиях / С. А. Александров, Г. И. Каневский, К. В. Курчуков [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2021. – № 3(397). – С. 45-55. – DOI 10.24937/2542-2324-2021-3-397-45-55.
- Ремез, Ю. В. Качка корабля / Ю. В. Ремез. — Л.: Судостроение, 1983. — 328 с.
- Таранов, А. Е. Численное моделирование динамики судна в задачах управляемости и качки / А. Е. Таранов, А. Э. Блищик // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – № 2(384). – С. 29-38. – DOI 10.24937/2542-2324-2018-2-384-29-38.
- Нечаев, Ю. И. Функция интерпретации при контроле динамики аварийного судна на волнении методами теории катастроф / Ю. И. Нечаев, О. Н. Петров // Морские интеллектуальные технологии. – 2014. – № 4-1(26). – С. 30-37.
- Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт – М.: ООО «АльянсПринт», 2020.
- Разработка полномасштабной теплогидравлической CFD модели первого контура реакторной установки АЭС-2006 В.В. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, О.В. Кудрявцев, Ю.Н. Надинский, А.Т. Нечаев, А.П. Скибин Суперкомпьютерные дни в России 2018 // Russian Supercomputing Days 2018 // RussianSCDays.org
- Методика исследования теплогидравлических процессов при воздействии внешних динамических сил / А. А. Сатаев, С. А. Чесноков, Д. И. Новиков, В. В. Андреев // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 1-1(51). – С. 23-30. – DOI 10.37220/MIT.2021.51.1.003.
- Оценка влияния внешней динамической силы на смешение неизотермических потоков в реакторной установке / А. А. Сатаев, А. А. Березин, О. В. Хвойнов, А. В. Дунцов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2019. – № 5. – С. 5-11. – DOI 10.17588/2072-2672.2019.5.005-011.
- Сатаев А.А., Андреев В.В., Самойлов А.М., Блохин А.А. Создание экспериментальной базы и методики системной оценки влияния изменения пространственной ориентации на теплогидравлические процессы. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; Специальный выпуск 2: 70–75.
- Разработка модели контура с естественной циркуляцией теплоносителя в условиях качки / А.М. Самойлов, А.А. Сатаев, А.А. Блохин, В.В. Иванов // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №. 6. – С. 19-26. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.6.019-026
- Патент на полезную модель № 202079 У1 Российская Федерация, МПК G01M 7/06. Двухплоскостной стенд для испытаний на качку и способ его применения для испытания теплогидравлических моделей: № 2020136082: заявл. 03.11.2020: опубл. 29.01.2021/В. В. Андреев, А. А. Сатаев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ).

### References

- Skorokhodov, D. A. Osnovnye printsipy sistemnykh issledovanii sudna na podvodnykh krylyakh [Basic principles of hydrofoil system research], D. A. Skorokhodov, Yu. E. Krylov, A. L. Starichenkov, Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021, № 1-1(51)., S. 118-125. DOI 10.37220/MIT.2021.51.1.017.
- Tselemeetskiy V.A. Osnovy tekhnicheskoy sistemologii.[Fundamentals of Technical systemology] T. 2., SPb. Vysshhee voenno-morskoe inzhenernoe uchilishche, 1996.
- Opredelenie neobkhodimoy moshchnosti pri dvizhenii ledokola "Lider" v shtormovykh usloviyakh [Determination of the required power during the movement of the icebreaker "Leader" in stormy conditions]. S. A. Aleksandrov, G. I. Kanevskiy, K. V. Kurchukov [i dr.], Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2021., № 3(397). S. 45-55. DOI 10.24937/2542-2324-2021-3-397-45-55.
- Remez, Yu. V. Kachka korablya [Ship pitching]. Yu. V. Remez., L.: Sudostroenie, 1983., 328 c.
- Taranov, A. E. Chislennoe modelirovanie dinamiki sudna v zadachakh upravlyayemosti i kachki [Numerical modeling of ship dynamics in controllability and pitching problems]. A. E. Taranov, A. E. Blishchik, Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2018., № 2(384)., S. 29-38., DOI 10.24937/2542-2324-2018-2-384-29-38.

6. Nechaev, Yu. I. Funktsiya interpretatsii pri kontrole dinamiki avariynogo sudna na volnenii metodami teorii katastrof [Interpretation function when monitoring the dynamics of an emergency vessel on a wave by methods of disaster theory], Yu. I. Nechaev, O. N. Petrov, Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2014., № 4-1(26), S. 30-37.
7. Prokhorov A., Lysachev M. Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt [Digital twin. Analysis, trends, world experience], M.: OOO «Al'yansPrint», 2020.
8. Razrabotka polnomasshtabnoy teplogidravlicheskoy CFD modeli pervogo kontura reaktornoy ustanovki AES-2006 [Development of a full-scale thermohydraulic CFD model of the first circuit of the NPP-2006 reactor plant] V.V. Volkov, L.A. Golibrodo, A.A. Krutikov, O.V. Kudryavtsev, Yu.N. Nadinskiy, A.T. Nechaev, A.P. Skibin Superkompyuternye dni v Rossii 2018, Russian Supercomputing Days 2018, RussianSCDays.org
9. Metodika issledovaniya teplogidravlicheskikh protsessov pri vozdeystvii vneshnikh dinamicheskikh sil [Methods of investigation of thermohydraulic processes under the influence of external dynamic forces]. A. A. Sataev, S. A. Chesnokov, D. I. Novikov, V. V. Andreev., Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021., № 1-1(51), S. 23-30. – DOI 10.37220/MIT.2021.51.1.003.
10. Ocenka vliyaniya vneshej dinamicheskoy sily na smeshenie neizotermicheskikh potokov v reaktornoj ustanovke [Assessment of the influence of an external dynamic force on the mixing of non-isothermal flows in the reactor plant], A. A. Sataev, A. A. Berezin, O. V. Hvojnov, A. V. Duncev, Vestnik IGEU. 2019. № 5. S. 5-11. DOI 10.17588/2072-2672.2019.5.005-011.
11. Sataev A.A., Andreev V.V., Samoilov A.M., Blohin A.A. Sozdanie eksperimental'noj bazy i metodiki sistemnoj ocenki vliyaniya izmeneniya prostranstvennoj orientacii na teplogidravlichekie processy. [Development of test facilities and procedure for system-based assessment of spatial orientation changes upon thermohydraulic processes], Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2021; Special'nyj vypusk 2: S. 70–75.
12. Razrabotka modeli kontura s estestvennoy tsirkulyatsiei teplonositelya v usloviyah kachki [Development of a circuit model with natural circulation of the coolant in pitching conditions], A.M. Samoilov, A.A. Sataev, A.A. Blokhin, V.V. Ivanov., Vestnik IGEU. 2021. №. 6., S. 19-26. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.6.019-026
13. Patent na poleznuyu model' № 202079 U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01M 7/06. Dvukhplanshennyj stend dlya ispytaniy na kachku i sposob ego primeneniya dlya ispytaniya teplogidravlicheskikh modeley [A two-plane rolling test bench and a method of its application for testing thermohydraulic models] № 2020136082: zayavl. 03.11.2020: opubl. 29.01.2021, V. V. Andreev, A. A. Sataev; zayavitel' federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Nizhegorodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. R.E. Alekseeva" (NGTU).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Александрович Сатаев**, аспирант, кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24 e-mail: sancho\_3685@mail.ru

**Aleksandr A. Sataev**, graduate student, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Minin St., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation. e-mail: sancho\_3685@mail.ru

**Александр Максимович Самойлов**, магистрант 1 года обучения, выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24. e-mail: samoilov15.03.1999@mail.ru

**Aleksandr M. Samoilov**, master's student 1 years of study, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Minin St., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation. e-mail: samoilov15.03.1999@mail.ru

**Алексей Алексеевич Блохин**, студент 4 курса, выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24. e-mail: blokhin-2016@list.ru

**Alexei A. Blokhin**, student 4 years of study, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Minin St., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation. e-mail: blokhin-2016@list.ru

**Вячеслав Викторович Андреев**, д-р. техн. наук, профессор, зав. каф. «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24 e-mail: vyach.andreev@mail.ru

**Vyacheslav V. Andreev**, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, head of Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Minin St., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation. e-mail: vyach.andreev@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.01.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 09.03.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2022.

**Научная статья**

УДК 004.932

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.022>

## **Распознавание транспортных средств по силуэтам – трехкаскадный метод машинного обучения в системах технического зрения**

**В.А. Дюк<sup>1</sup> v\_duke@mail.ru, И.Г. Малыгин<sup>1,2</sup> malygin\_com@mail.ru, В.И. Прицкер<sup>1</sup> vip@iptran.ru**

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук;

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

**Аннотация.** В районах морских портов, на морских и сухопутных трассах актуальной является задача учета и контроля различных транспортных средств. Для решения этой задачи всё чаще используются технические системы распознавания таких средств, использующие видеокамеры. Однако видеоизображения по ряду причин не всегда бывают высокого качества. Поэтому теоретический и практический интерес представляет задача распознавания транспортных средств по сильно загруженным их изображениям – силуэтам. В нашем исследовании используется экспериментальный материал из репозитория данных UCI (UCI Machine Learning Repository) и предлагается трехкаскадный метод машинного обучения для решения этой задачи. В первом каскаде формируется множество прецедентов классов – объектов с привязанными к ним собственными локальными контекстно-зависимыми метриками, обеспечивающими прецедентам максимально возможную «сферу действия». На втором каскаде применяются методы поиска логических правил (корректирующих логических правил), для которых описаниями (признаками) объектов служат расстояния от определенных в первом каскаде объектов в их собственных локальных пространствах. В третьем каскаде производится организация взаимодействия корректирующих логических правил путем их ансамблирования. Вероятность правильной классификации транспортных средств составила  $P = 0,972$  (для оценки применялся метод 10-fold кросс-валидации). Этот результат превзошел ранее известные результаты.

**Ключевые слова:** видеоизображения, системы технического зрения, техническое зрение, транспортные средства, машинное обучение, классификация силуэтов

**Для цитирования:** Дюк В.А., Малыгин И.Г., Прицкер В.И. Распознавание транспортных средств по силуэтам – трехкаскадный метод машинного обучения в системах технического зрения // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 162—167.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.022>

## **Vehicle recognition by silhouettes – a three-stage machine learning method in computer vision systems**

**Vyacheslav A. Duke<sup>1</sup> v\_duke@mail.ru, Igor G. Malygin<sup>1,2</sup> malygin\_com@mail.ru, Vladimir I. Pritsker<sup>1</sup> vip@iptran.ru**

<sup>1</sup>Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences; <sup>2</sup>St. Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** In the areas of seaports, on sea and land routes, the task of accounting and control of various vehicles is urgent. To solve this problem, technical recognition systems of such means using special sensors are increasingly used. However, video images are not always of high quality for a number of reasons. Therefore, the theoretical and practical interest is the problem of recognition of vehicles on their heavily coarsened images – silhouettes. Our study uses experimental material from the UCI (UCI Machine Learning Repository) data repository and proposes a three-stage machine learning method to solve this problem. In the first cascade, a set of class precedents is formed - objects with their own local context-dependent metrics attached to them, providing the precedents with the maximum possible "scope of action". At the second cascade, methods of searching for logical rules (corrective logical rules) are applied, for which the descriptions (attributes) of objects are the distances from the objects defined in the first cascade in their own local spaces. In the third cascade, the interaction of corrective logical rules is organized by their ensemble. The probability of correctly classifying vehicles was  $P = 0.972$  (a 10-fold cross-validation method was used for the assessment). This result surpassed previously known results.

**Key words** video images, vehicles, computer vision systems, machine learning, classification of silhouettes

**For citation:** Vyacheslav A. Duke, Igor G. Malygin, Vladimir I. Pritsker Vehicle recognition by silhouettes – a three-stage machine learning method in computer vision systems // Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 162—167.

### **Введение**

При разработке интеллектуальных систем в настоящее время всё чаще применяется машинное обучение (Machine Learning – ML), использующее методы создания и обучения по накопленным или сконструированным данным компьютерных моделей,

корректно отражающих разнообразные отношения объектов реального или идеального мира. Машинное обучение являются основой широкого спектра технологий логистики и цепочек поставок нового поколения. McKinsey прогнозирует, что наибольший вклад машинного обучения будет заключаться в предоставлении операторам цепочки

поставок для более значительного понимания того, как можно улучшить производительность цепочки поставок, и прогнозирования аномалий в логистических затратах и производительности до того, как они произойдут [1]. Примеры применения машинного обучения на транспорте: транспортное планирование на основе данных сотовой связи, прогноз загруженности на парковках, распознавание транспортных происшествий при помощи социальных сетей и др. [2]. Важное место для решения различных задач на транспорте занимают системы компьютерного (технического) зрения, при создании которых используются методы ML.

Разные разработчики систем искусственного интеллекта применяют различные алгоритмы ML от простейших типа наивного байесовского классификатора до достаточно изощренных типа метода опорных векторов (Support Vector Machine – SVM). Проблемы, с которыми сегодня сталкиваются разработчики, порождены спецификой данных и ранее нами описывались в ряде статей и монографий (например, в [3]). В сжатом виде специфика данных следующая:

- 1) нечеткость целевых показателей и критериев;
- 2) неопределенность, неточность, разнотипность и неизвестная размерность описаний;
- 3) гетерогенность эквифинальных состояний исследуемых систем;
- 4) наличие русел и джокеров разного, заранее неизвестного формата с неизвестной локализацией;
- 5) неточная разметка больших данных.

Попытки построения предиктивных моделей в предметных областях с подобными характеристиками породили большое количество подходов. Относительно свежий опрос 20000 специалистов, проведенный популярной платформой для испытания и сравнения алгоритмов машинного обучения Kaggle (<https://www.kaggle.com/>) показал, что профессионалы в области науки о данных наиболее часто использовали алгоритмы множественного регрессионного анализа, деревья и леса решений, и методы построения ансамблей алгоритмов с использованием процедуры градиентного бустинга [4].

Здесь следует отметить, что при конструировании ансамблей исследователи отбирают алгоритмы, ориентируясь в основном на некоррелированность ошибок этих алгоритмов и не вдумываясь в «физический» смысл такого отбора.

Ниже мы рассмотрим предложенный нами трехкаскадный метод машинного обучения, в основе которого при формировании конечного ансамбля лежит понимание смысла взаимодействия входящих в ансамбль алгоритмов. Описание трехкаскадного метода сопровождается примерами решения задачи компьютерного зрения с использованием экспериментального материала, описанного нами ранее в [5].

### **Общая характеристика объектов исследования**

#### **Задача исследования**

Требуется построить алгоритм автоматического распознавания типов транспортных средств, используя набор геометрических признаков, характеризующих их силуэты.

#### **Описание экспериментальных данных**

Для выделения признаков, описывающих форму силуэтов, использовалась специальная система HIPS (Hierarchical Image Processing System). С помощью этой системы силуэт описывался набором параметров, основанных на измерениях моментов, и на других измерениях типа отношения максимального радиуса к минимальному, статистических характеристик этих измерений (дисперсия, асимметрия, эксцесс). Кроме того, форма силуэтов описывалась рядом эвристических характеристик, отражающих компактность изображения, окружность, прямоугольность, впадины и др.

В эксперименте участвовали 4 транспортных средства: двухэтажный автобус (bus), микроавтобус Chevrolet (van), легковые автомобили Saab 9000 и Opel Manta 400.

Изображения объектов были получены камерой, расположенной на возвышении (34,2; 37,5 и 30,8 градусов). В данном эксперименте для упрощения этапа предобработки изображений объектов размещались на поверхности, подсвеченной рассеянным светом. Изображения имели слабое разрешение 128×128 пикселей, и были получены в серой шкале с 64 уровнями градаций серого.

Для получения силуэтов автомобилей вводился эвристически подобранный порог, и на выходе экспериментаторы имели бинарное изображение (только оттенки черного и белого цвета). Кроме того, применялась процедура для удаления помех в виде ошибочно белых элементов изображения и черных точек. Все автомобили во время съемки вращались в координатной сетке от 0 до 360 градусов.

Всего было получено 210 изображений легковых автомобилей Opel, 216 изображений Saab, 218 изображений двухэтажного автобуса и 202 изображений микроавтобуса.

Геометрические признаки силуэтов приведены в табл. 1. Полное описание и ссылки на таблицу экспериментальных данных приведены на страницах репозитория Statlog [7].

Ранее нами с использованием системы Deep Data Diver [3] была построена модель классификации силуэтов трехмерных объектов (автомобилей разных типов) с ошибкой классификации на тестовой выборке всего в 8,1 %. Известны результаты других исследователей, которым удалось построить ещё более точную модель. Например, в работе [8] приведены результаты точности классификации автомобилей при использовании наилучшего алгоритма, которым оказался SVM (при специально подобранном типе ядра) при различном объеме обучающей выборки (табл. 2).

**Таблица 1  
Названия геометрических признаков силуэтов транспортных средств и их обозначения**

Оригинальное наименование признака	Тип признака	Обозначение
Compactness	Количественный	x_1
Circularity	Количественный	x_2
Distance Circularity	Количественный	x_3
Radius ratio	Количественный	x_4
Pr.axis aspect ratio	Количественный	x_5
Max.length aspect ratio	Количественный	x_6
Scatter ratio	Количественный	x_7
Elongatedness	Количественный	x_8

Pr.axis rectangularity	Количественный	x_9
Max.length rectangularity	Количественный	x_10
Scaled variance along major axis	Количественный	x_11
Scaled variance along minor axis	Количественный	x_12
Scaled radius of gyration	Количественный	x_13
Skewness about major axis	Количественный	x_14
Skewness about minor axis	Количественный	x_15
Kurtosis about minor axis	Количественный	x_16
Kurtosis about major axis	Количественный	x_17
Hollows ratio	Количественный	x_18

Таблица 2  
Точность классификации с использованием алгоритма SVM при различном объеме обучающей выборки

Объем обучающей выборки	25%	50%	75%
Точность классификации на тестовой выборке	0,941	0,961	0,969

В следующих разделах приводится описание разработанного трехкаскадного метода машинного обучения с иллюстрацией его работы на всех этапах для приведенных данных.

### Первый каскад

В первом каскаде применяется наиболее распространенный метод экстенсионального подхода – метод  $k$ -ближайших соседей. Выбор этого метода связан с тем, что ему присущи строго доказанная асимптотическая точность в задачах классификации данных, свобода от априорных предположений о структуре данных, устойчивость к аномальным выбросам, интерпретируемость и др. Вместе с тем, основной проблемой использования экстенсионального метода  $k$ -ближайших соседей является необходимость хранить в памяти всю обучающую выборку. Как указывалось, в наших работах [9], данная проблема получает свое разрешение путем формирования для объектов выборки собственных контекстно-зависимых локальных метрик, существенно расширяющих «сферу действия» объектов, как представителей своего класса. При таком подходе модели машинного обучения, основанные на экстенсиональном подходе, представляют собой ансамбли относительно небольшого круга объектов с привязанными к ним собственными оптимизированными метриками.

Дадим пояснение этому положению. Применение напрямую метода  $k$ -БС приводит к удовлетворительным, но не самым лучшим по сравнению, в частности, с методом «случайный лес» (random forest) результатам. При этом увеличение числа ближайших соседей  $k$  только ухудшает точность классификации транспортных средств. Этот феномен хорошо объясняется, если рассмотреть диаграмму рассеяния расстояний от какого-либо объекта до всех остальных объектов выборки. Приведем такую диаграмму, например, для объекта № 152, относящегося к классу легковых автомобилей (рис. 1).

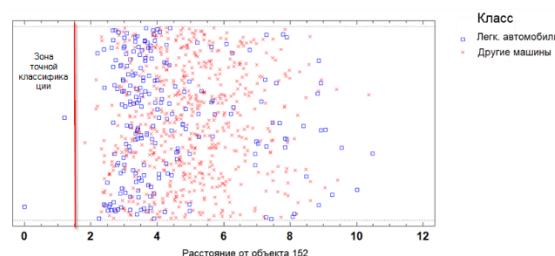


Рис. 1. Диаграмма рассеивания расстояний объектов выборки до объекта 152

Как следует из рис. 1, в исходном 18-мерном пространстве признаков к выбранному объекту 152 лишь первый ближайший сосед попадает в область точной классификации класса «легковые автомобили». Далее по мере увеличения номера ближайшего соседа разные классы фактически «перемешаны», встречаются со сопоставимыми значениями вероятностей. Аналогичная картина наблюдается и для других объектов выборки.

Для конструирования локальной метрики могут использовать различные критерии и алгоритмы, рассмотрение которых выходит за рамки настоящей статьи. В данном случае в качестве критерия оптимальности локальной метрики использовалась площадь под концентрированной кривой ошибок (Concentrated Receiver Operating Characteristic – CROC) [10], которая использовалась в алгоритме поиска взвешенной метрики Хэмминга:

$$d_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \mathbf{w}_i^T \Delta_{ij},$$

где  $\mathbf{x}_i$  и  $\mathbf{x}_j$  соответственно  $i$ -й и  $j$ -й объекты выборки;  $\Delta_{ij} = (|x_1 - x_1|, |x_2 - x_2|, \dots, |x_M - x_M|)^T$ ;  $M$  – количество признаков;  $\mathbf{w}_i = (w_1, w_2, \dots, w_M)^T$  – весовой вектор с неотрицательными элементами.

В результате построения локальной взвешенной метрики для объекта № 152 из 18-ти исходных признаков эффективными оказались только 2 признака –  $x_3$  с весом 2,1 и  $x_5$ , взятый с весом 4,8. Диаграмма рассеивания расстояния объектов выборки до объекта 152 в его собственном локальном пространстве приведена на рис. 2.

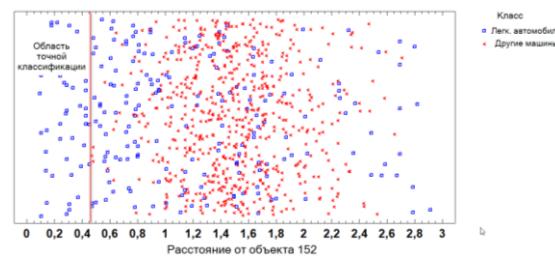


Рис. 2. Диаграмма рассеивания расстояний объектов выборки до объекта 152 в его собственном локальном пространстве

Из рис. 2 видно, что область точной классификации класса «легковые автомобили» существенно расширилась. Если раньше в исходном пространстве признаков в эту область попадал всего один объект, то теперь в локальном оптимизированном пространстве сюда вошло 43 объекта. Аналогичным образом была расширена «сфера действия» других объектов выборки, построив для них собственные локальные метрики.

Всего для достижения точности классификации автомобилей в 95 % потребовалось 52 объекта с оптимизированными локальными метриками (11 объектов из класса «двуухэтажный автобус», 24 объекта из класса «легковые автомобили Saab 9000 и Opel Manta 400» и 17 объектов из класса «микроавтобус Chevrolet». Отбор этих объекта осуществлялся с использованием метода случайного поиска, где критерием для добавления объекта служила величина прироста значения правильной классификации для каждого класса в отдельности.

Таблица 3  
Примеры формул для вычисления расстояний в оптимизированных локальных пространствах

Номер объекта	Формула для вычисления расстояния в локальном пространстве
1	$1,25\Delta_6 + 1,22\Delta_8 + 1,61\Delta_{14}$
5	$0,91\Delta_6 + 0,43\Delta_8 + 1,52\Delta_{10} + 3,67\Delta_{14} + 0,03\Delta_{15}$
60	$0,24\Delta_6 + 6,08\Delta_{10} + 3,44\Delta_{14} + 0,18\Delta_{15}$
118	$3,47\Delta_6 + 1,33\Delta_8 + 0,22\Delta_{10} + 0,10\Delta_{15}$
30	$1,03\Delta_6 + 8,56\Delta_{10} + 2,12\Delta_{14}$
100	$1,85\Delta_3 + 4,13\Delta_8 + 7,42\Delta_{10} + 1,94\Delta_{14}$
103	$2,85\Delta_1 + 1,86\Delta_3 + 2,80\Delta_8 + 6,57\Delta_{10} + 0,98\Delta_{14}$
51	$1,69\Delta_6 + 1,43\Delta_8 + 0,44\Delta_{10}$
63	$0,19\Delta_4 + 1,72\Delta_6 + 1,53\Delta_8$
200	$0,29\Delta_3 + 4,10\Delta_5 + 1,34\Delta_6$
113	$0,53\Delta_3 + 4,16\Delta_5 + 1,66\Delta_6$
23	$1,29\Delta_6 + 0,37\Delta_8 + 1,39\Delta_{10}$
10	$1,43\Delta_6 + 1,19\Delta_8 + 1,06\Delta_{14}$
20	$8,10\Delta_3 + 3,65\Delta_{10} + 2,04\Delta_{13}$
50	$6,49\Delta_{14} + 14,33\Delta_{17}$

Примечание: Примеры формул приведены для возможности их проверки любым независимым исследователем, обратившимся к данным репозитория Statlog [11]. Здесь в каждой строке таблицы  $\Delta_J$  означает расстояние Хэмминга по одному признаку  $x_J$  от объекта с соответствующим номером.

### Второй каскад

Основанием для введения второго каскада является то, что информативными для модели классификации могут служить не только области, ближайшие к тому или иному объекту в его локальном пространстве, но и области, наиболее удаленные от этого объекта. На это обстоятельство мы указывали ранее, например, в работе [12].

На рис. 3 изображены совмещенные разнонаправленные для альтернативных классов гистограммы распределения расстояний всех объектов исследуемой выборки от выбранного объекта № 118 в его локальном пространстве. Как видно, на этом рисунке можно выделить 2 области, в каждой из которых наблюдается значительное преобладание количества объектов одного класса над количеством объектов другого класса.

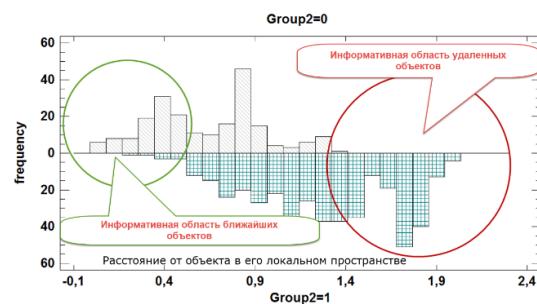


Рис. 3. Совмещенные гистограммы распределения расстояний всех объектов исследуемой выборки от выбранного объекта № 118 в его локальном пространстве

Чтобы использовать отмеченный факт для повышения точности модели классификации, на втором каскаде применяются методы поиска логических правил (так называемый логический корректор), для которых описаниями (признаками) объектов служат расстояния от определенных в первом каскаде объектов в их собственных локальных пространствах. Поиск таких правил осуществляется с помощью с помощью системы Deep Data Diver, которая является нашей собственной теоретической разработкой [12] и использует принципиально новый подход к поиску логических закономерностей в данных. Применяется технология SRMD (Structural Resonance in Multidimensional Data), основанная на концепции контекстно-зависимых локальных метрик и эффекте структурного резонанса в многомерных данных. Программная реализация системы осуществлена компанией Дип Паттернс (<http://deeppatterns.ru>).

В результате работы системы Deep Data Diver было выделено 17 логических корректирующих правил, для организации взаимодействия которых предназначен третий каскад.

### Третий каскад

Для организации взаимодействия корректирующих логических правил можно применять различные подходы, предназначенные для работы с ансамблем алгоритмов. Ансамблем (Ensemble, Multiple Classifier System) называется алгоритм, который состоит из нескольких алгоритмов машинного обучения, а процесс построения ансамбля называется ансамблированием (ensemble learning). Простейший пример ансамбля – усреднение нескольких алгоритмов. Другой простейший пример ансамбля – комитет большинства, использующий мажоритарный критерий в процедуре голосования. Вместо обычного усреднения/голосования часто используют усреднение с весами (weighted averaging) / голосование с весами, когда есть основания по-разному доверять разным алгоритмам, участвующим в ансамбле. Достаточно подробный обзор темы ансамблирования алгоритмов содержится в [13].

В нашем практическом примере мы использовали метод  $k$ -ближайших соседей, как способ ансамблирования. Для применения этого метода сначала рассчитывались расстояния от правил логического корректора до всех объектов и затем осуществлялся подбор числа  $k$ , при котором

достигалась максимальная вероятность правильной классификации на тестовых выборках.

Наилучший результат вероятности правильной классификации был получен для  $k = 11$  и составил  $P = 0,972$  (для оценки применялся метод 10-fold кросс-валидации). Таким образом, этот результат превзошел результаты, которые были получены нами ранее [5], а также результаты, приведенные в [1].

### **Заключение**

В районах морских портов, на морских и сухопутных трассах актуальной является задача учета и контроля различных транспортных средств. Для решения этой задачи всё чаще используются технические системы распознавания таких средств, использующие видеокамеры. Однако видеозображения по ряду причин не всегда бывают высокого качества. Поэтому теоретический и практический интерес представляет задача распознавания транспортных средств по сильно загрубленным их изображениям – силуэтам.

В нашем исследовании используется экспериментальный материал из репозитория данных UCI (UCI Machine Learning Repository) и предлагается трехкаскадный метод машинного обучения для решения этой задачи.

В первом каскаде разработанного метода машинного обучения формируется множество предшественников классов – объектов с привязанными к ним собственными локальными контекстно-

зависимыми метриками, обеспечивающими прецедентам максимально возможную «сферу действия». Всего для достижения точности классификации автомобилей в 95 % потребовалось 52 объекта с оптимизированными локальными метриками. Отбор этих объекта осуществлялся с использованием метода случайного поиска, где критерием для добавления объекта служила величина прироста значения правильной классификации для каждого класса в отдельности. На втором каскаде применяются методы поиска корректирующих логических правил, для которых описаниями (признаками) объектов служат расстояния от определенных в первом каскаде объектов в их собственных локальных пространствах. Основанием для введения второго каскада является то, что информативными для модели классификации могут служить не только области, ближайшие к тому или иному объекту в его локальном пространстве, но и области, наиболее удаленные от этого объекта. Поиск таких правил осуществлялся с помощью системы Deep Data Diver. В третьем каскаде производится организация взаимодействия корректирующих логических правил путем их ансамблирования. Вероятность правильной классификации транспортных средств составила  $P = 0,972$  (для оценки применялся метод 10-fold кросс-валидации). Этот результат превзошел ранее известные результаты.

### **Литература**

1. Louis Columbus. Roundup Of Machine Learning Forecasts And Market Estimates, 2020. – <https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2020/01/19/>.
2. Методы и процедуры интеллектуального анализа данных в транспортном планировании / Под ред. Жанказиева С. В. – СПб.: Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2021. – 192 с.
3. Дюк В. А. Логические методы машинного обучения (инструментальные средства и практические примеры). – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. – 248 с.
4. <https://customerthink.com/top-machine-learning-algorithms-frameworks-tools-and-products-used-by-data-scientists/>.
5. Дюк В.А., Малыгин И.Г. Сравнение алгоритмов распознавания типов транспортных средств по параметрам их силуэтов // Морские интеллектуальные технологии. 4 (42), Т. 4. 2018. – С. 197-201.
6. <http://www.ics.uci.edu/~mlearn/MLRepository.html>.
7. [https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+\(Vehicle+Silhouettes\)](https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+(Vehicle+Silhouettes)).
8. Noyunsan C., Katanyukul T., Saikaew K. (2018). Performance evaluation of supervised learning algorithms with various training data sizes and missing attributes. Engineering and Applied Science Research, 45(3), P. 221-229.
9. Дюк В.А., Брюс Ф.О., Богданов А.В. Перспектива экстенсиональных методов машинного обучения // Информация и космос. – № 2. 2020. – С. 69-76.
10. Swamidass S.J., Azencott C., Daily K., Baldi P. A CROC stronger than ROC: measuring, visualizing and optimizing early retrieval // Bioinformatics (2010) 26 (10): 1348-1356.
11. [https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+\(Vehicle+Silhouettes\)](https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+(Vehicle+Silhouettes)).
12. Дюк В.А. Методология поиска логических закономерностей в предметной области с нечеткой системологией (на примере клинико-экспериментальных исследований): дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 – СПбГУ, 2005. – 309 с.
13. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. – Springer-Verlag, 2009. – 746 p.

### **References**

1. Louis Columbus. Roundup Of Machine Learning Forecasts And Market Estimates, 2020. – <https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2020/01/19/>.
2. Metody i protsedury intellektualnogo analiza dannykh v transportnom planirovaniy [Methods and procedures of data mining in transport planning] / Pod red. Zhankaziyeva S. V. – SPb.: Izdatelsko-poligraficheskaya kompaniya «КОСТА». 2021. – 192 s.
3. Duke V. A. Logicheskiye metody mashinnogo obucheniya (instrumentalnyye sredstva i prakticheskiye primery) [Logical methods of machine learning (tools and practical examples)]. – SPb.: Izdatelsko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. 2020. – 248 s.

4. <https://customerthink.com/top-machine-learning-algorithms-frameworks-tools-and-products-used-by-data-scientists/>.
5. Duke. V.A.. Malygin I.G. Sravneniye algoritmov raspoznavaniya tipov transportnykh sredstv po parametram ikh siluetov [Comparison of algorithms for recognizing vehicle types by parameters of their silhouettes] // Morskiye intellektualnyye tekhnologii. 4 (42). T. 4. 2018. – S. 197-201.
6. <http://www.ics.uci.edu/~mlearn/MLRepository.html>.
7. [https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+\(Vehicle+Silhouettes\)](https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+(Vehicle+Silhouettes)).
8. Noyunsan, C., Katanyukul, T., & Saikaew, K. (2018). Performance evaluation of supervised learning algorithms with various training data sizes and missing attributes. Engineering and Applied Science Research, 45(3), 221-229.
9. Duke V.A. Bryus F.O. Bogdanov A.V. Perspektiva ekstensionalnykh metodov mashinnogo obucheniya [Perspective of extensional methods of machine learning] // Informatsiya i kosmos. – № 2. 2020. – S. 69-76.
10. Swamidass S. J., Azencott C., Daily K., Baldi P. A CROC stronger than ROC: measuring, visualizing and optimizing early retrieval // Bioinformatics (2010) 26 (10): 1348-1356.
11. [https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+\(Vehicle+Silhouettes\)](https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+(Vehicle+Silhouettes)).
12. Duke V. A. Metodologiya poiska logicheskikh zakonomernostey v predmetnoy oblasti s nechetkoy sistemologiyey (na primere kliniko-eksperimentalnykh issledovanii) [Methodology of the search for logical patterns in the subject area with fuzzy systemology (on the example of clinical and experimental studies)]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.13.01 – SPbGU.. 2005. – 309 s.
13. Hastie, T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. – Springer-Verlag, 2009. – 746 p.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Вячеслав Анатольевич Дюк**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: v\_duke@mail.ru

**Игорь Геннадьевич Малыгин**, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13.; профессор ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр.149 А., e-mail: malygin\_com@mail.ru

**Владимир Ильич Прицкер**, кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: vip@iptran.ru

**Vyacheslav A. Duke** – professor, Dr. Sci. (Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: v\_duke@mail.ru

**Igor G. Malygin** – professor, Dr. Sci. (Eng), Director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; St. Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, e-mail: malygin\_com@mail.ru

**Vladimir I. Pritsker** – assistant professor, PhD (Eng.), Scientific secretary, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: vip@iptran.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 06.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

**Научная статья**

УДК 656.6.058

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.023>

## Оценка влияния свойств судна на его экологическую безопасность

В.Ю. Каминский<sup>1</sup> Kaminskyvyy@yandex.ru, Д.А. Скороходов<sup>1</sup> skorohodda@mail.ru,

Е.Ю. Кузнецова<sup>1</sup> helhena@mail.ru, М.Л. Маринов<sup>1</sup> marinlomsky@gmail.com

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

**Аннотация.** В статье утверждается, что экологическая безопасность судна определяется его герметичностью - основным фактором, влияющим на возможные экологические последствия в случае аварий и инцидентов. Указанный фактор является одной из характеристик свойств судна, включающих обеспечение плавучести, остойчивости, мореходности и прочности. Рассмотрена связь этих характеристик с герметичностью корпуса и их влияние на экологическую обстановку. Для оценки экологической безопасности судна в функции сохранения его целостности предлагается использовать метод парных сравнений по определению коэффициентов важности различных факторов, а также аддитивную свёртку обобщённой функции технической полезности (эффективности). Сформулированы преимущества метода парных сравнений при определении коэффициента важности характеристик, который упрощает принятие решения по предпочтению определённых целей или показателей. Показано, что одним из наиболее удобных способов построения функции полезности является обобщенная функция желательности Харрингтона. В рамках оценки влияния свойств судна на экологическую безопасность подтверждена целесообразность использования показателя технической полезности в табличной форме функции Харрингтона, в аналитическом виде – в форме функции желательности Харрингтона с отрицательным градиентом и в форме релейной функции технической полезности.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, показатели безопасности, герметичность, функция желательности Харрингтона, аддитивная свёртка, шкала желательности.

**Для цитирования:** Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Кузнецова Е.Ю., Маринов М.Л. Оценка влияния свойств судна на его экологическую безопасность, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 168—174.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.023>

## Assessment of the impact of the ship's properties on its environmental safety

Valery Yu. Kaminsky<sup>1</sup> Kaminskyvyy@yandex.ru, Dmitriy A. Skorokhodov<sup>1</sup> skorohodda@mail.ru,

Elena Y. Kuznetsova<sup>1</sup> helhena@mail.ru, Marin L. Marinov<sup>1</sup> marinlomsky@gmail.com

<sup>1</sup>Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences

**Abstract.** The article states that the environmental safety of a vessel is determined by its tightness - the main factor affecting the possible environmental consequences in the event of accidents and incidents. This factor is one of the characteristics of the ship's properties, including ensuring buoyancy, stability, seaworthiness and strength. The connection of these characteristics with the tightness of the housing and their impact on the environmental situation is considered. To assess the environmental safety of a vessel in the function of preserving its integrity, it is proposed to use the method of paired comparisons to determine the coefficients of importance of various factors, as well as an additive convolution of the generalized function of technical utility (efficiency). The advantages of the method of paired comparisons in determining the coefficient of importance of characteristics, which simplifies the decision-making on the preference of certain goals or indicators, are formulated. It is shown that one of the most convenient ways to construct the utility function is the generalized Harrington desirability function. As part of the assessment of the impact of the ship's properties on environmental safety, the expediency of using the technical utility indicator in tabular form of the Harrington function, in analytical form – in the form of the Harrington desirability function with a negative gradient and in the form of a relay function of technical utility was confirmed.

**Keywords:** environmental safety, safety indicators, tightness, Harrington desirability function, additive convolution, desirability scale.

**For citation:** Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Elena Y. Kuznetsova, Marin L. Marinov, Assessment of the impact of the ship's properties on its environmental safety, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 168—174.

### Введение

В работе [1] определён перечень показателей экологической безопасности водного транспорта. В работе [2] показано, что для разнородных показателей оценки экологической безопасности, при отсутствии корреляции между ними, предпочтительна аддитивная форма показателя

интегральной оценки. С учётом предмета настоящего исследования – экологической безопасности – как свойства судна быть безопасным для окружающей среды и населения, рассмотрим влияние этого свойства на природную среду и жизнедеятельность человека и сформируем метод оценки эффективности мероприятий по повышению экологической безопасности.

### Структура показателей экологической безопасности судна

Для оценки различных аспектов функционирования судна и их влияния на экологическую безопасность в работе [1] предложена следующая групповая структура показателей.

Выделяется пять групп факторов оценки:

- свойства судна (фактор) и подфакторы: плавучесть, остойчивость, непотопляемость, управляемость, мореходность, прочность, живучесть;
- внешние условия: ветер, волнение, течение, плохая видимость (туман, темное время суток), температура воздуха, айсберги, подводные препятствия (рифы, скалы, отмелы), интенсивность судоходства, стесненность в районе плавания;
- отказы судовых технических средств и оборудования;
- воздействие грузов: функциональных систем, устройств целевого назначения (промышленное оборудование, системы поиска и добычи полезных ископаемых со дна моря и др.);
- ошибки в действиях персонала судна: экипажа, бездействие лиц, обеспечивающих безопасность судна.

Однако для описания экологических последствий, целесообразно иначе структурировать перечисленные факторы. Это объясняется тем, что большинство из них, так или иначе могут привести к нарушению герметичности корпуса судна, с последующим разливом топлива и нефтепродуктов, радиоактивным заражением (аварии на судах с ядерными энергетическими установками) и другим видам негативного влияния опасных грузов. Поэтому, интегральным фактором, влияющим на экологическую безопасность судна, является сохранение целостности (герметичности) судна ( $\Phi_g$ ), который зависит:

1. от свойств судна ( $\Phi_1$ ), характеризующихся плавучестью ( $\Phi_{11}$ ), остойчивостью ( $\Phi_{12}$ ), мореходностью ( $\Phi_{13}$ ), прочностью корпуса ( $\Phi_{14}$ ), которая, в свою очередь, зависит от общей прочности корпуса судна ( $\Phi_{141}$ ), от локальной прочности корпуса ( $\Phi_{142}$ ), а также от прочности корпуса при слеминге ( $\Phi_{143}$ );
2. от особенностей опасного груза, перевозимого судном ( $\Phi_2$ ), характеризующегося соблюдением / несоблюдением: правил хранения груза ( $\Phi_{21}$ ), правил перевозки опасных грузов ( $\Phi_{22}$ ), не учётом особенностей физико-химических свойств груза ( $\Phi_{23}$ ), а также условиями размещения груза на судне ( $\Phi_{24}$ );
3. от ошибочных действий экипажа ( $\Phi_3$ ) при заправке топливом ( $\Phi_{31}$ ), при погрузке-выгрузке опасных грузов ( $\Phi_{32}$ );
4. от пожаров и взрывов ( $\Phi_4$ ) на судне ( $\Phi_{41}$ ), нахождении вблизи других пожаро- и взрывоопасных судов ( $\Phi_{42}$ ) и береговых объектов ( $\Phi_{43}$ ).

Итак, экологическая безопасность судна определяется его герметичностью - основным фактором, влияющим на возможные экологические последствия в случае аварий и инцидентов [2-8].

Для оценки экологической безопасности судна в функции сохранения его целостности воспользуемся аддитивной свёрткой обобщённой функции технической полезности (эффективности)  $i$ -ой цели ( $P_i$ ) (среднее арифметическое), имеющей вид:

$$P_i = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} P_{ij}; \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = 1,0, \quad (1)$$

где:  $n$  – число подцелей ( $j$ ) в рамках  $i$ -ой цели;  $\lambda_{ij}$  - коэффициент важности  $j$ -ой подцели  $i$ -ой цели;  $P_{ij}$  - полезность  $j$ -ой подцели  $i$ -ой цели.

Подобная форма свертки обобщённой функции наглядна, позволяет расставить приоритеты и нивелировать недостатки одной подцели за счет другой.

Ранжирование всего комплекса целей (подцелей) является сложной задачей. В этом случае целесообразно использовать метод парных сравнений, который позволяет упростить принятие экспертного решения. Построим матрицу коэффициентов важности (взвешенная матрица) (табл.1).

Таблица 1

$f_{ij}$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{14}$	$f_{15}$	$f_{16}$	$\sum_{j=1}^n f_{ij}$	$\lambda_{ij}$
$f_{11}$	-	2	2	2	2	2	10	0,279
$f_{12}$	1	-	0	0	1	1	3	0,083
$f_{13}$	1	0	-	0	1	1	3	0,083
$f_{14}$	1	0	0	-	1	1	3	0,083
$f_{15}$	1	2	2	2	-	1	8	0,222
$f_{16}$	1	2	2	2	2	-	9	0,250
							$\lambda_j = 36$	1,000

В боковик табл.1 поместим условные обозначения целей (подцелей). В заголовочной части, также запишем условные обозначения целей (подцелей). Последняя графа таблицы предназначена для нормированных значений коэффициентов важности -  $\lambda_{ij}$ .

Ячейки таблицы заполняются следующим образом. Каждый элемент (цель, подцель) строки попарно сравнивается со всеми элементами (целями, подцелями) столбцов. При этом, если, например, цель  $f_{11}$  более важна чем цель  $f_{12}$ , то в ячейку таблицы помещается число 2, если менее важна – 1, если цели имеют одинаковую важность – 0. После заполнения таблицы весовые коэффициенты построчно складываются с размещением суммы в ячейках предпоследней графы, а затем, в соответствии с формулой (2), вычисляются нормированные коэффициенты, значения которых помещаются в ячейки последней графы.

$$\lambda_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^m f_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij}} \quad (2)$$

где:  $m$  - число подцелей (критериев или показателей);  $i$  - номер строки;  $j$  - номер столбца;  $f_{ij}$  - число в ячейке таблицы.

Подобную таблицу составляет каждый эксперт (в процедуре участвуют  $n$  экспертов). Затем  $n$  экспертов сводят данные своих таблиц в общую таблицу, в которой в ячейку с номером  $ij$  записывается число, равное сумме чисел в ячейках с этим номером во всех  $n$  таблицах. Для оценки согласованности мнений экспертов определяется коэффициент согласия -  $V$  [2]:

$$V = \frac{4}{nm(n-1)(m-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_f^2, \quad (3)$$

где  $C_f^2$  - количество сочетаний «по два» из перечня  $f_{ij}$ .

При полном согласии экспертов  $V = 1$ , при предельном несогласии:  $V = (n-2)/2(n-1)$  – при четном  $n$  и  $V = (n-1)/2(n-2)$  – при нечетном  $n$ .

### Выбор функций технической полезности

Одним из наиболее удобных способов оценки значимости различных характеристик объекта с точки зрения оценки их влияния на реализацию определенных функций является применение обобщенной функции желательности Харрингтона [2]. В основе построения этой функции лежит идея преобразования натуральных значений частных показателей в безразмерные величины для построения зависимости с использованием шкалы желательности или предпочтения. Шкала желательности учитывает психофизиологический аспект анализа и предназначена для выявления соответствия между физическими и психологическими параметрами процесса или явления. Здесь под физическими параметрами понимаются всевозможные показатели (отклики), характеризующие функционирование исследуемого объекта, в нашем случае – это факторы, характеризующие экологическую безопасность судна. Под психологическими параметрами понимаются субъективные предпочтения эксперта, принимающего решение о значимости того или иного отклика (параметра управления) в рамках выполняемого анализа. Для формирования шкалы желательности (полезности), целесообразно использовать таблицы соответствия различных предпочтений, выраженных в качественном и числовом виде (табл. 2).

Шкала полезности формируется в интервале от нуля до единицы. Значение полезности  $P(x) = 0$  соответствует абсолютно неприемлемому значению параметра, а значение  $P(x) = 1,0$ , наоборот, наиболее предпочтительному.

Таблица 2

Полезность	Отметки на шкале
Очень хорошо	1,00 - 0,81
Хорошо	0,8 - 0,64
Удовлетворительно	0,63 - 0,38
Плохо	0,37 - 0,21
Очень плохо	0,20 - 0,00

Выбор точек по шкале полезности 0,63 и 0,37 объясняется удобством вычислений:  $0,63 \cong 1 - (1/e)$ ,  $0,37 \cong 1/e$ . Значение  $P(x) = 0,37$  обычно соответствует границе допустимых значений. В табл. 2 представлены числа, соответствующие некоторым точкам кривой, которая задается уравнением

$$P(x) = \exp(-\exp(-x)). \quad (4)$$

На оси ординат графика, представляющего формулу (4), наносятся значения желательности, в диапазоне от 0 до 1,0. По оси абсцисс указываются значения отклика (параметра или подцели). За начало отсчета 0 по этой оси выбирается значение, соответствующее желательности 0,37. Это точка перегиба кривой, что представляет определенные удобства при вычислениях. То же верно и для значения желательности 0,63.

Кривая строится по результатам анализа принимаемых специалистами решений и обладает свойствами, характеризующими функцию полезности: непрерывность, монотонность и

гладкость. В областях значений функции желательности, близких к 0 и 1,0 чувствительность ее существенно ниже, чем в средней зоне.

Специалист, принимающий решение, всегда располагает сформулированными требованиями:  $X_{min}$ ,  $X_{max}$  применительно к качеству определённой цели (подцели). Тогда отметка на шкале желательности  $P(x) = 0,37$  соответствует  $X_{min}$ , и функция желательности Харрингтона преобразуется или в функцию полезности с положительным градиентом:

$$P(x) = \exp(-\exp(-kx)), \quad (5)$$

$$\text{где } k = \frac{6}{x_{max}},$$

или в функцию полезности с отрицательным градиентом:

$$P(x) = \exp(-\exp(-k(x_{max} - x))) \quad (6)$$

$$\text{где } k = \frac{6}{x_{max} - x_{min}}.$$

Свойства судна ( $\Phi_i$ ) будем оценивать в соответствии с принятой групповой структурой ( $\Phi_{11} \dots \Phi_{14}$ ).

Рассмотрим подфактор  $\Phi_{11}$  – плавучесть. Объем надводной непроницаемой части судна является мерой запаса плавучести. Согласно основному закону, определяющему плавучесть судна (закон Архимеда), сила тяжести судна –  $P$  равна плавучести.

$$P = \gamma \cdot V; \Delta = \rho \cdot V \quad (7)$$

где:  $\gamma = \rho \cdot g$  – удельный вес забортной воды;  $\rho$  – плотность забортной воды,  $\text{т}/\text{м}^3$ ,  $V$  – объем погруженной части корпуса (объемное водоизмещение),  $\text{м}^3$ ;  $g = 9,81 \text{ м}/\text{s}^2$  – ускорение свободного падения;  $P$  – сила тяжести судна,  $\text{т}$ ;  $\Delta$  – масса вытесненной судном воды,  $\text{т}$ .

Чем больше запас плавучести, тем больше воды, при аварии, может принять судно внутрь прочного корпуса, оставаясь на плаву. Моделируя утрату плавучести судном при приёме воды, воспользуемся функцией полезности Харрингтона с отрицательным градиентом.

$$P_{11}(w) = \exp(-\exp(-k(w_{max} - w_i))), \quad (8)$$

$$\text{где } k = \frac{6}{w_{max} - w_{min}}; w_{min} \text{ – минимальное значение},$$

характеризующее отсутствие воды внутри прочного корпуса, соответствующее максимальному объему надводной водонепроницаемой части корпуса судна. По оси абсцисс – отклик (параметр) – графика, представляющего формулу (8), это состояние обозначается нулём, а по оси ординат – желательность – единицей (максимальная величина технической полезности или эффективности (максимальный запас плавучести));  $w_{max}$  – максимальная значение, соответствующее достаточно количеству воды внутри прочного корпуса, при котором судно теряет плавучесть (объем надводной водонепроницаемой части корпуса судна равен нулю). По оси абсцисс графика это состояние отмечается максимальной величиной, а по оси ординат – нулём (запас плавучести исчерпан).

Следующий подфактор, характеризующий свойства судна – остойчивость ( $\Phi_{12}$ ). Критерием остойчивости судна является метacentрическая высота – возвышение метацентра (центр кривизны

траектории, по которой перемещается центр величины в процессе наклонения судна) над центром тяжести. Чем больше этот параметр, тем выше начальная остойчивость судна. Метацентрическая высота уменьшается обратно пропорционально площади свободной поверхности жидкости, поступающей в корпус.

Уменьшение поперечной метацентрической высоты  $\delta h$  в зависимости от площади свободной поверхности жидкости, поступающей в корпус в ходе аварии, выражается формулой:

$$\delta h = -\frac{l \cdot b^2}{12 \cdot W} \quad (9)$$

где:  $l$  - длина отсека, м;  $b$  - ширина отсека, м;  $W$  - водоизмещение судна, м<sup>3</sup>.

Применим функцию технической полезности Харрингтона с отрицательным градиентом, имея ввиду, что в начале координат по оси абсцисс отложено значение максимальной метацентрической высоты судна. Движение вдоль оси абсцисс от точки начала координат отвечает уменьшению поперечной метацентрической высоты в результате затопления отсека в соответствие с формулой (10). По оси ординат осуществляем оценку эффективности судна в функции остойчивости в относительных единицах.

$$P_{12}(w) = \exp(-\exp(-k(w_{max} - w_i))) \quad (10)$$

где  $k = \frac{6}{-w_{min}}$ ;  $w_{min}$  - минимальное значение, соответствующее отсутствию воды внутри прочного корпуса, что соответствует максимальной величине поперечной метацентрической высоты судна, а значит, по оси абсцисс, соответствует нулю, а по оси ординат - единице (максимальной величине технической полезности или эффективности свойства запаса плавучести);  $w_{max}$  - максимальное значение, соответствующее количеству воды, при котором судно теряет остойчивость.

На оси абсцисс отложим величину, отражающую максимальный объём поступившей в корпус судна воды, а по оси ординат - ноль (судно утратило остойчивость).

Если в качестве аргумента использовать поперечную метацентрическую высоту, процесс можно охарактеризовать функцией желательности Харрингтона с положительным градиентом:

$$P(h) = \exp(-\exp(-kh_i)), \quad (11)$$

где  $k = \frac{6}{h_{max}}$ .

Для судна, находящегося в рейсе, поперечную метацентрическую высоту можно вычислить приближённо по периоду его качки:

$$h = \left( k \cdot \frac{B}{T} \right)^2, \quad (12)$$

где:  $k$  - коэффициент, (табл. 3);  $B$  - ширина судна, м;  $T$  - период бортовой качки, сек.

Таблица 3

Тип судна	
Пассажирское водоизмещением около 40000 т	0,87
Пассажирское водоизмещением около 27000т	0,81
Малое пассажирское судно	0,77
Грузовое в полном грузу	0,78
Рыболовный траулер	0,76

Буксир	0,76
Большой катер	0,80

Для большей точности период качки  $T$  следует определять по нескольким качаниям – путём деления суммарного времени на число качаний. По другой формуле поперечная метацентрическая высота определяется периодом качки и высотой борта судна.

$$h = \frac{4}{T^2} \cdot \left( \frac{B^2 \cdot \delta}{10,3 \cdot 3 \alpha^2} + \frac{H^2}{11} \right), \quad (13)$$

где:  $H$  - высота борта;  $\alpha$  - коэффициент полноты действующей ватерлинии;  $\delta$  - коэффициент общей полноты судна.

Мореходность ( $\Phi_{13}$ ). Эта подцель приобретает существенное значение в штормовых условиях, когда собственные колебания судна совпадают с вынужденными по крену и возникает резонанс бортовой качки, приводящий к гибели судна и возможным экологическим последствиям [9]. Оценка мореходности судна в штормовых условиях может быть проведена с использованием функции полезности релейного вида: неудовлетворительно –  $\Phi_{13} = 0$ , когда судно при бортовой качке входит в резонанс и удовлетворительно -  $\Phi_{13} = 1$ , когда условия для возникновения резонанса отсутствуют.

Прочность корпуса ( $\Phi_{14}$ ). Зависит от общей прочности корпуса ( $\Phi_{141}$ ), от локальной прочности корпуса судна ( $\Phi_{142}$ ), прочности корпуса при слеминге (удар днищевой части носовой оконечности корпуса о воду в процессе продольной качки судна при его движении на встречных волнах) ( $\Phi_{143}$ ).

Прочность корпуса судна при общем продольном изгибе называется общей прочностью -  $\Phi_{141}$ . Для транспортных судов, в особенности крупнотоннажных, наиболее опасным видом деформации является общий изгиб, при этом различают прогиб и перегиб. При прогибе палуба оказывается сжатой, а днище растянутым, при перегибе – наоборот. При плавании на волнении начальная деформация увеличивается и становится опасной, особенно при попадании корпуса с начальным прогибом на половину волны, а корпуса с начальным перегибом - на вершину волны. Деформация кручения корпуса может оказаться опасной для судов с большим раскрытием палубы (в частности, балкеров), особенно при плавании на косом волнении. Наряду с участием в общем продольном изгибе отдельные конструкции корпуса (палуба, днище, борта, переборки) участвуют в местном изгибе под воздействием местных усилий (воздействие груза, льда, забортной воды, причала, грунта, киль - блоков дока). Расчёт и оценка местного изгиба выполняется отдельно.

На современных судах реализуется система мониторинга, предназначенная для информирования капитана и штурманского персонала о параметрах качки и нагрузках на корпус как в процессе рейса, так и в течение погрузочных/разгрузочных работ. Датчики напряжений устанавливаются на главной палубе около каждого грузового трюма и в местах возникновения максимальных сил сжатия и растяжения. Они должны фиксировать возникающие напряжения в рейсе и при грузовых операциях. Микропроцессор интерпретирует сигналы датчиков, для сравнения их с допустимыми значениями,

одобренными национальной Администрацией. Рекомендуется соединять его с компьютером при погрузке-разгрузке с целью получения сведений о фазе погрузочных или разгрузочных операций (начальная, промежуточная, конечная). Процессор с помощью звуковых и визуальных средств информирует о высоких уровнях нагрузки в корпусе, приближающихся к пороговым значениям.

Сигналы от акселерометров характеризуют вертикальное и поперечное перемещение корпуса судна. На основе анализа этой информации вырабатываются предупреждения о возможности скрэминга.

Эффективность трёх составляющих прочности судна можно оценить функцией технической полезности Харрингтона с отрицательным градиентом. В начале координат по оси абсцисс отмечаем ситуацию, связанную с отсутствием напряжений, вызывающих утрату судном прочности. Двигаясь от начала координат вдоль оси абсцисс отслеживаем увеличение составляющих напряжений, определяющих прочность судна и, при достижении максимальных пороговых значений, констатируем минимум эффективности судна по подцели – прочность корпуса судна. В этом случае по оси ординат получим оценку эффективности судна в функции прочности корпуса судна в относительных единицах.

$$P_{14i}(\xi) = \exp(-\exp(-k(\xi_{max} - \xi_i))) \quad (14)$$

где  $k = \frac{6}{\xi_{max} - \xi_{min}}$ ;  $\xi_{min}$  - минимальное значение на оси абсцисс – ноль, а по оси ординат - единица (максимальная величина технической полезности или эффективности по свойству «прочность судна»);  $\xi_{max}$  - максимальная пороговая величина составляющих прочности, при которых корпус судна теряет герметичность; по оси ординат соответствует нулю (минимальной технической полезности или эффективности по свойству «прочность судна»).

## Заключение

Сформирована структура показателей экологической безопасности судна. Показано, что интегральным фактором, влияющим на экологическую безопасность судна, является сохранение его целостности. Для оценки герметичности корпуса судна предлагается использовать аддитивную функцию технической полезности. Аддитивная свертка обобщенной функции полезности отличается наглядностью, возможностью ввести приоритеты и позволяет компенсировать недостатки технической системы.

Показаны преимущества метода парных сравнений при определении коэффициента важности цели (подцели), который упрощает принятие решения по предпочтению целей или показателей.

Показано, что одним из наиболее удобных способов построения функции полезности является обобщенная функция желательности Харрингтона. В основе построения этой функции лежит алгоритм преобразования натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу желательности или предпочтения. Психофизиологическая шкала желательности устанавливает соответствие между физическими и психологическими параметрами. Здесь под физическими параметрами понимаются всевозможные отклики, характеризующие функционирование исследуемого объекта, в нашем случае параметры или характеристики объекта управления.

В рамках оценки влияния свойств судна на экологическую безопасность подтверждена целесообразность использования показателя технической полезности в табличной форме функции Харрингтона, в аналитическом виде – в форме функции желательности Харрингтона с отрицательным градиентом и в форме релейной функции технической полезности.

## Литература

- Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Показатели экологической безопасности водного транспорта // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1 (53). С. 161-170.
- Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Кузнецова Е.Ю. Оценка эффективности обеспечения экологической безопасности персонала судна // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 1-1 (55). С. 128-132.
- 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.
- Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Аксёнов В.А. Оценка экологической эффективности судоходной компании // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (53). С. 86-91.
- Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Исследование алгоритмической структуры системы управления движением судна на подводных крыльях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 153-163.
- Кинни Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях предпочтения и замещения. - М.: Радио и связь, 1981. - 560 с.
- 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.
- Кожевин Д.Ф., Поляков А.С., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Экологическая безопасность при авариях на морской составляющей мультимодальной трубопроводной системы // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №1-2(48). С.180-188.
- 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.

### References

1. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Pokazateli ekologicheskoy bezopasnosti vodnogo transporta [Indicators of environmental safety of water transport] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 3-1 (53). pp. 161-170.
2. Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu., Kuznecova E.Y. Ocenka effektivnosti obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti personala sudna [Assessment of the effectiveness of ensuring the environmental safety of the ship's personnel] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2022. № 1-1 (55). pp. 128-132.
3. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Marinov M.L. Sistematisatsiya 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.
4. 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.
5. Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Issledovanie algoritmicheskoy struktury sistemy upravleniya dvizheniem sudna na podvodnyh krylyah [Investigation of the algorithmic structure of the hydrofoil motion control system] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). pp. 153-163.
6. Kini R.L., Rajfa H. Prinyatie reshenij pri mnogih kriteriyah predpochteniya i zameshcheniya [Decision-making under many criteria of preference and substitution]. M.: Radio i svyaz', 1981. 560 p.
7. Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N., Kaminsky V.Yu. Modelirovaniye dejstviy 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.
8. Kozhevnik D.F., Polyakov A.S., Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Ekologicheskaya bezopasnost pri avariyah na morskoy sostavlyayushchey multimodalnoy truboprovodnoy sistemy [Environmental safety in case of accidents on the marine component of a multimodal pipeline system] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 1-2 (48). pp. 180 – 188.
9. 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 sea crossing] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 3-1 (45). S. 20-28.

### 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: Kaminskyvv@yandex.ru

**Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Елена Юрьевна Кузнецова**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: helhena@mail.ru

**Марин Любенов Маринов**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: marinlomsky@gmail.com

**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, Vasilevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvv@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, Vasilevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

**Elena Y. Kuznetsova**, Ph.D. (Eng), researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: helhena@mail.ru

**Marin L. Marinov**, PhD (Eng), leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: marinlomsky@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

**Научная статья**

УДК 656.61.052: 629.123: 004.021

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.024>

## **Ситуационная модель автоматического мониторинга безопасности судовождения**

**В.В. Астреин<sup>1</sup>** [Astrein-vadim@rambler.ru](mailto:Astrein-vadim@rambler.ru) **В.И. Филатов<sup>2</sup>** [Filatov\\_viktor1994@mail.ru](mailto:Filatov_viktor1994@mail.ru)

<sup>1,2</sup>Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93

**Аннотация.** Первостепенной задачей при проектировании любых автономных судов является разработка Системы безопасности судовождения (СБС), где важнейшими элементами служат подсистемы автоматического мониторинга, прогнозирования, планирования и принятия решений. В статье рассматриваются методологические основы построения подсистемы автоматического мониторинга параметров автономного судна, который позволяет по некоторой совокупности датчиков в режиме реального времени прогнозировать состояние судна с необходимой достоверностью. Особенно это актуально при наличии внутренних или внешних угроз, приводящих систему в аварийное состояние. Для обеспечения внутренней и внешней безопасности судна предполагается декомпозиция глобальной цели на множество ситуационных подцелей и разделения многообразия движения судна на ряд режимов, которые выбираются в управляющей подсистеме. Задачи мониторинга для обеспечения безопасности подсистем внутренней структуры судна направлены на наблюдение и контроль за техническим и функциональным состоянием внутренней структуры судна. Во внешней среде мониторинг безопасности судна определяется комплексом управлений судном по взаимоотношению с окружающей средой и другими судами. Эти технологические задачи не совместны. Здесь возникает задача управления автоматическим мониторингом, которую предлагается решать путем реконфигурации структуры мониторинга - композицией выполнения операций во времени, при которых обеспечивается перевод из заданного в требуемое многоструктурное макросостояние для решения той или иной ситуационной задачи. Это достигается активацией или dezактивацией подсистем мониторинга и оценивания параметров подсистем (опасное или безопасное состояние). Способ реконфигурации мониторинга заключается введением обобщенного вектора структуры рассматриваемых подсистем, при этом, если наблюдается опасность, то подсистема находится в активном режиме, а если опасности нет, то в пассивном режиме. Данный способ позволяет добиваться реконфигурации параметров системы мониторинга для решения задач безопасности судовождения и перевода судна из опасного в безопасное состояние.

**Ключевые слова:** Система безопасности судовождения, автономное судовождение, управляемый автоматический мониторинг, результаты мониторинга, параметр, реконфигурация, состояние судна и окружающей среды.

**Для цитирования:** Астреин В.В., Филатов В.И. Ситуационная модель автоматического мониторинга безопасности судовождения. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 174—184.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.024>

## **Automatic situational monitoring System for Navigation Safety**

**Vadim V. Astrein<sup>1</sup>** [Astrein-vadim@rambler.ru](mailto:Astrein-vadim@rambler.ru) **Viktor I. Filatov<sup>2</sup>** [Filatov\\_viktor1994@mail.ru](mailto:Filatov_viktor1994@mail.ru)

<sup>1,2</sup>Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** The primary task in the design of any autonomous vessels is the development of a safety shipping system (SSS), where the most important elements are subsystems of automatic monitoring, forecasting, planning and making decisions. The article discusses the methodological basis for building a subsystem of automatic monitoring of the parameters of an autonomous vessel, which allows, according to some real time sensors, to predict the condition of the vessel with the necessary reliability. This is especially true in the presence of internal or external threats that bring the system to emergency. To ensure the internal and external safety of the vessel, a decomposition of the global target is supposed to be decomposition into many situational subtargets and dividing the variety of vessel movement into a number of modes that are selected in the control subsystem. The tasks of monitoring to ensure the safety of subsystems of the internal structure of the vessel are aimed at observing and monitoring the technical and functional state of the internal structure of the vessel. In the external environment, the monitoring of the safety of the vessel is determined by the complex of departments of the vessel for relations with the environment and other ships. These technological tasks are not joint. Here, the task of controlling automatic monitoring arises, which is proposed to be solved by reconfiguration of the monitoring structure - the composition of the execution of time operations, which ensures the transfer from a given multi -structural macrostate to solve a situational problem. This is achieved by activation or decontamination of monitoring subsystems and evaluating subsystem parameters (dangerous or safe condition). The method of reconfiguration of monitoring is the introduction of a generalized vector of the structure of the subsystems in question, and if there is a danger, then the subsystem is in active mode, and if there is no danger, then in passive mode. This method allows you to seek reconfiguration of the parameters of the monitoring system to solve the problems of the safety of navigation and transfer of the vessel from dangerous to a safe state.

**Key words:** Safety shipping system, autonomous navigation, controlled automatic monitoring, monitoring results, parameter, reconfiguration, the condition of the vessel and the environment.

**For citation:** Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov, Automatic situational monitoring System for Navigation Safety , Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 174—184.

## Введение

Исходя из постановки проблемы автономного судовождения [1] становится ясным, что мониторинг и контроль в автономном судовождении должен производиться автоматическими системами, полностью исключающими человека-оператора. Отсюда ставится задача разработки соответствующей методологии автоматического мониторинга и контроля параметров состояния судна, которая по некоторой совокупности датчиков позволяет производить мониторинг и контроль параметров состояния судна с необходимой достоверностью. В рассматриваемую Систему автоматического мониторинга и контроля параметров судна (САМК) должны входить соответствующие математические методы и формы организации сбора, обработки и передачи информации, позволяющей определять и распознавать опасные и безопасные состояния системы. Для реализации задач САМК важны: высокое качество инструментария, разработка критериев оценивания, индикаторов и показателей, организация измерений, статистической обработки результатов и их адекватная интерпретация.

В рассматриваемом контексте ситуационный мониторинг в автономном судовождении – это постоянное наблюдение за каким-либо процессом с целью установления его соотношения желаемому результату или первоначальному предположению. Контроль – это типичный пример действий, когда нужно выявить «опасность или опасности» по показаниям датчиков подсистем судна в соответствии с существующим порядком в режиме реального времени, т.е. в режиме обработки данных, при котором обеспечивается взаимодействие вычислительной системы САМК с внешними по отношению к ней процессами в темпе, соизмеримым со скоростью протекания этих процессов.

## 1. Элементно-функциональная структура и целевая декомпозиция СБС

Рассматриваемая СБС состоит из сложных активных технических объектов ( $O$ ) (судов), которые являются элементами СБС, информация об их функциональных состояниях передается в виде текущих значений измерительной информации в соответствующую систему управления судном.

Безопасность системы в целом обеспечивается деятельности некоторого количества судов, распределенных в некотором пространстве окружающей среды. При возникновении опасности, соответственно,  $O$  должно учитывать проявления не только статических и динамических опасностей «природы» ( $E$ ) и множества одиночных  $O$  (на рисунке 1 -  $(O^r$  и  $O^k$ ), но и активности группы  $O$ , объединенных по признаку существования опасности в кластер ( $K$ ) единой целью ( $T$ ) и связанных между собой каналами связи. Проявления для одиночных ( $O^r$  и  $O^k$ ), в основном связаны с поддержанием своего функционирования и

компенсации ошибки, возникающей от воздействия среды ( $E$ ) и целями ( $T^r$  и  $T^k$ ) - плаванию по заранее намеченному пути), причем ( $T^r$  и  $T^k$ ), как правило, не совпадают. Проявления  $O$  в кластере ( $K$ ) отличаются от предыдущих, наличием опасности, возникающей от совместного целевого взаимодействия группы ( $O^0, O^1, O^n$ ) для обеспечения безопасности плавания и описываются следующим образом - считается, что каждое  $O$  стремится к выбору таких своих безопасных состояний, которые являются наилучшими с точки зрения их предпочтений при заданных условиях и управляющих воздействиях, а управляющие воздействия, в свою очередь, зависят от внутренних состояний каждого  $O$ .

В свою очередь  $O$  представляет собой симбиоз технических подсистем: автоматических управляемых по заранее разработанной программе для решения задач регулирования, сглаживания и т.п. и подсистем с активными техническими элементами (АЭ), обладающими свободой выбора своего состояния, собственных целей, средств их достижения и возможности прогнозировать поведение управляющего органа.

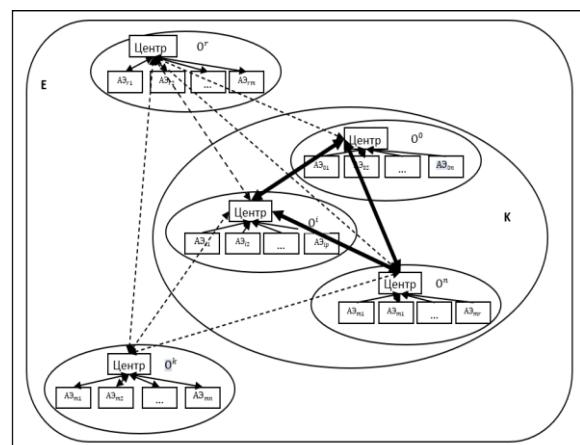


Рис. 1. Концептуальная модель СБС

При исследовании процессов мониторинга и контроля за параметрами состояния в рассматриваемой СБС будем использовать принцип целевой функциональной декомпозиции. СБС построена так, что глобальная (общая) задача безопасности достигается решением ситуационных задач каждым из судов во внутренней и внешней структуре:

$$\text{ЗПР}_0 = (\text{ЗПР}_{\text{ВБ}}, \text{ЗПР}_{\text{НБП}}, \text{ЗПР}_{\text{ПСС}}) \quad (1)$$

где: ЗПР<sub>0</sub> – общая задача безопасности судовождения судна, ЗПР<sub>ВБ</sub> – задача обеспечения безопасности подсистем внутренней структуры судна (ВБ), ЗПР<sub>НБП</sub> – задача обеспечения навигационной безопасности плавания (НБП), ЗПР<sub>ПСС</sub> – задача предупреждения столкновений судов (ПСС).

В зависимости от создавшейся ситуации, в судовождении выделяют следующие задачи управления судном: регулирования (стабилизации

курса), ситуационного управления (плавание среди навигационных опасностей), планирования целесообразного поведения (предупреждения столкновений судов). В рассматриваемых ситуативных задачах управление автономным судном сводится к целенаправленным процедурам изменения режимов управления судном (курсом и(или) скоростью). Концептуальное описание деятельности каждого судна строится на основании информации об их функциональном и техническом состоянии. В очень упрощенном виде состояние судна ( $S_0$ ) можно определить как множество многоструктурных состояний подсистем:

$$S_0 = \{S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_i, S_{i+1}, S_{i+2}, S_{i+3}, \dots, S_n\} \quad (2)$$

где:  $S_1$  – состояние системы управления курсом (СУК);  $S_2$  - состояние системы управления скоростью (СУВ);  $S_3$  – состояние или наличие угрозы от навигационных опасностей (НО) плавания;  $S_4$  – состояние или наличие угрозы опасности столкновения судов (ПСС);  $S_i$  – состояние системы связи и взаимообмена информации между судами;  $S_{i+1}$  – состояние технических средств судовождения (ТСС);  $S_{i+2}$  – состояние корпуса судна (КС);  $S_{i+3}$  – состояние природы (степень негативного воздействия среды) (Е);  $S_n$  – некоторое состояние подсистемы -  $n$ .

Учитывая такие особенности СБС, первой задачей, при управлении по состоянию, является задача определения параметров мониторинга и контроля состояний судна для решения ЗПР<sub>0</sub>.

## 2. Входные и выходные параметры мониторинга и контроля

Параметры состояния ( $S_0$ ) — это величины, служащие для характеристики безопасности системы. Параметры ( $S_0$ ) могут быть внутренние и внешние непосредственно или опосредовано находящиеся во взаимосвязи. Для описания состояния судна достаточно знать не все параметры, а лишь некоторые из них.

### 2.1 Мониторинг внутренней структуры СБС

Безопасность судна зависит от состояния внутренней структуры судна, при котором оно способно решать ЗПР<sub>ББ</sub> и определяется его работоспособностью, исправностью. Рассматривая внутреннюю структуру судна как сложную техническую систему с основным назначением - перевод судна из любого начального состояния в любое другое заданное состояние, в том числе из опасного состояния в безопасное (функция управления) достигается Системами управления курсом (СУК) и скоростью (СУВ).

Мониторинг этих систем, можно рассматривать в двух аспектах:

- с точки зрения технического состояния внутренней структуры судна;
- с точки зрения состояния функционирования.

При мониторинге технического состояния СУК и СУВ в основном доступны повреждения износового вида, развитие которых сопровождается изменением рабочих параметров машин, механизмов (герметичности, зазоров и др.), т.е. свойствами элементов СУК и СУВ, обеспечивающих их нормальную работу. Свойства элементов СУК и СУВ в некоторый момент времени  $t$  могут быть

охарактеризованы совокупностью параметров  $x'_1, x'_2, \dots, x'_n$ . Параметры  $x'_i$ - величины переменные и обладают изменчивостью. При постройке судна построечные параметры элементов можно охарактеризовать как идеальные  $x_i^0$ , а в период их эксплуатации - от степени износа и разрушения их деталей  $x_i$ . Тогда разность:

$$x_i = x'_i - x_i^0 \quad (3)$$

будет характеризовать отклонение  $i$ -го параметра от построечного (идеального). Тогда свойства структуры СУК или СУВ могут быть охарактеризованы различными наборами параметров элементов:

$$x_i = f(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) \quad (4)$$

следовательно техническое состояние СУК и СУВ определяется совокупностью технических параметров элементов, характеризующих возможное отклонение функционирования от нормального, приводящее к отказу.

При функциональном подходе СУК и СУВ рассматривается как единая система управления, обеспечивающая процессы движения и маневрирования судном. При оценке функционирования СУК и СУВ процессы управления судном можно охарактеризовать количественно совокупностью параметров внутреннего состояния судна ( $s_1, s_2, \dots, s_m$ ). Величина этих параметров зависит от состояния окружающей среды и от режима и условий работы (скорости, нагрузки, температуры воздуха и т.д.). Если режимы работы СУК и СУВ регламентируются, то любое изменение величины указанных параметров должно соответствовать  $j$  – му изменению состояния судна  $S_j$ . На основании этого параметры выходных процессов управления судном рассматриваются как функции состояния:

$$s_j = S_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

Исходя из представленных рассуждений, каждый из функциональных параметров ( $s_1, s_2, \dots, s_m$ ), формирующих представление о техническом состоянии СУК и СУВ, зависит от внутренних параметров ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) и ограничений ( $v_1, v_2, \dots, v_n$ ), которые представляют собой подзадачи:

$$\begin{aligned} s_1 &= S_1(x_1, x_2, \dots, x_n, v_1, v_2, \dots, v_n), \\ s_2 &= S_2(x_1, x_2, \dots, x_n, v_1, v_2, \dots, v_n), \\ &\dots \\ s_j &= S_j(x_1, x_2, \dots, x_n, v_1, v_2, \dots, v_n). \end{aligned} \quad (6)$$

СУК и СУВ формируют информацию о своем техническом и функциональном состоянии, которая передается в САМК для контроля и прогнозирования последующих действий. В процессе эксплуатации СУК и СУВ очень важно иметь точную информацию о текущем состоянии подсистем. При этом в автономном плавании важно выявление не только аварийного, но и предаварийного состояния элементов СУК и СУВ для предотвращения угрозы неуправляемости, посадки на мель или столкновения судов.

Структурно СУВ — это пропульсивный комплекс, включающий главный двигатель, движитель и корпус судна. Если это двигатель внутреннего сгорания, то он состоит из подсистем подачи топлива, подачи и очистки воздуха, газораспределения, цилиндроворшневой группы и т.д., формирующих

информацию о своем техническом и функциональном состоянии по формуле (5).

К основным показателям, характеризующим работу судна с механическим двигателем (дизельного двигателя), относят: номинальную мощность  $N_{e.h.}$  [кВт] - длительную эффективную мощность дизеля, назначаемую и гарантируемую изготовителем при заданных частоте вращения и окружающих условиях, для которых предназначен дизель; крутящий момент  $M_{kp.}$  [Н·м] – средний крутящий момент, развиваемый дизелем на конце вала отбора мощности; частоту вращения  $n$ , [ $\text{с}^{-1}$ ] – число оборотов вала отбора мощности дизеля в единицу времени и др. параметры. Если совокупности параметров в момент времени –  $t$  представить одномерными временными рядами  $N_{e.h.}^{(t)}$  и  $M_{kp.}^{(t)}$ :

$$(n_1^{(t)}, n_2^{(t)}, \dots, n_N^{(t)}); M_{kp.}^{(t)} (m_1^{(t)}, m_2^{(t)}, \dots, m_N^{(t)}) \quad (7)$$

тогда состояние  $S_1^{(t)}$  можно представить двумерным времененным рядом в  $t$ -й момент времени  $S_1^{(t)} = \langle n_{e.h.1}^{(t)}, m_{kp.1}^{(t)} \rangle$  или как комплексный ряд состояний компонентов:

$$S_1^{(t)} = (s_1^{(t)}, \dots, s_N^{(t)}) \quad (8)$$

Анализ многопараметрической внутренней структуры судна показывает, что основными функциональными параметрами, свидетельствующими о состоянии СУК угол кладки руля ( $\beta_{\text{кладки руля}}$ ), скорость перекладки руля ( $\Omega = \dot{\beta}$ ) или время кладки руля ( $t_{\text{кладки руля}}$ ). Тогда  $S_2$  – состояние СУК определяется множеством взаимозависимых значений ( $\beta_{\text{кладки руля}}, \Omega$ ) в момент времени –  $t$ . По аналогии с (8) можно записать:

$$S_2^{(t)} = (s_2^{(t)}, \dots, s_N^{(t)}) \quad (9)$$

## 2.2 Параметры мониторинга и контроля навигационной безопасности судна. Система вождения по маршруту

Система вождения по маршруту (СВМ) (Track control systems) предназначена для мониторинга и контроля процесса следования судна по ЛЗП (линии заданного пути) в автоматическом режиме при решении ЗПР<sub>НБП</sub>. СВМ может быть представлена в теоретико-множественном виде, который включает в себя циклическое множество:

$ZPR_{\text{НБП}} = \langle G_{\text{НБП}}, L_{\text{НБП}}, R, Q, l, P_{\text{НБП}}, X \rangle$  (10) среди которых:  $G_{\text{НБП}}$  – глобальная задача НБП (планирование маршрута судна),  $L_{\text{НБП}}$  – локальная задача НБП (следование по ЛЗП),  $R$  – отношения между глобальной и локальной задачами,  $Q$  – свойства всех элементов СВМ, которыми в данном случае являются геометрические соотношения, основанные на решении локодромических треугольников, высокоточные параметры которых могут получены с помощью ГНСС,  $l$  – ограничения, накладываемые на задачу (в данном случае  $l$  – перпендикулярное смещение относительно ЛЗП, которое в иностранной литературе носит название XTE),  $P_{\text{НБП}}$  – параметры мониторинга НБП, а также  $X$  – циклическое множество, в которое входят элементы векторов движения, притяжения и ограничений, накладываемых на направление

текущего движения. В свою очередь циклическая группа  $X$  – формируется из:

$X = \langle GenC, COG, BTW, BTWmin, BTWmax \rangle$  (11) где:  $BTW$  – направление на целевую путевую точку (Bearing to Waypoint),  $COG$  – путевой угол (Course over ground),  $GenC$  – генеральный курс (статический элемент, полученный при планировании рейса),  $BTWmin, BTWmax$  – допустимые экстремальные значения  $BTW$ . Таким образом  $X$  – может быть сведен к многомерной временной функции с помощью современных методов аппроксимации, в том числе с помощью ИНС.

При решении  $G_{\text{НБП}}$  необходимо утвердить автоматически-выбранный путь, и для этого необходимо подтвердить отсутствие навигационных опасностей на нём и внутри коридора безопасности (КБ), ограниченного шириной  $[l_{min}, l_{max}]$ , который характеризуют заданное перпендикулярное отклонение от оси-ребра между последовательными путевыми точками (ПТ), имеющего направления  $GenC$ . При этом,  $\exists l_{min} \neq l_{max} \wedge l_{max} \neq l_{min} \wedge \exists l_{max} = l_{min}$ . В данной работе подразумевается третье условие, хотя в практических задачах могут выполняться и первые 2.

Существуют различные методы расчёта величин  $l_{max} = \|l_{min}\| = l_{ext}$ , которые можно разделить на детерминированные, а также – стохастические в которых предполагается, что распределение  $l$  по ширине КБ подчиняется закону, близкому нормальному (рис 2):

$$P(l) = \frac{1}{m_{||l||}\sqrt{2\pi}} \int_{l_{min}}^{l_{max}} \exp\left(-\frac{l_{ext}^2}{2m_{||l||}^2}\right) dl \quad (12)$$

На основании этого величина  $l_{ext} \cong M(l_i(\vec{T}))$  вычисляется, как математическое ожидание, непрерывное случайной величины, рассчитанной для неравноточных измерений, где неравноточность определяется районом плавания судна, а  $m_{||l||}$  – среднеквадратическая погрешность  $l_{ext}$ . В данном случае, традиционно, при решении задачи НБП подразумевается, что  $l_{ext} = \{l_1, l_2, l_3\}$ , где индексы 1 – стеснённые воды, 2 – прибрежное плавание, 3 – открытое море и т.д.

Задача СВМ является оптимизационной задачей с ограничениями, и может быть в общем виде представлена в общем, как:

$$\begin{aligned} F(\vec{E}_1, \vec{E}_2) &\rightarrow \min, \\ l_{min} \leq l_i(\vec{T}) &\leq l_{max}, i = \overline{1, M} \\ \vec{T} &= (t_1, \dots, t_n) \end{aligned} \quad (13)$$

где:  $E_1(\vec{T}) = COG(\vec{T}) - BTW(\vec{T})$  – ошибка в направлении вектора следования к ПТ,  $E_2(\vec{T}) = BTW(\vec{T}) - GenC(\vec{T})$  – ошибка в направлении вектора следования по ребру  $GenC$ ,  $F(\vec{E}_1, \vec{E}_2)$  – целевая функция, заданная в непрерывном виде поверхности, с помощью двумерной функции Лагранжа:

$$L(\vec{E}_1, \vec{E}_2) = f(\vec{E}_1) + \sum_{i=1}^m e_{2i} l_i(\vec{E}_1) \quad (14)$$

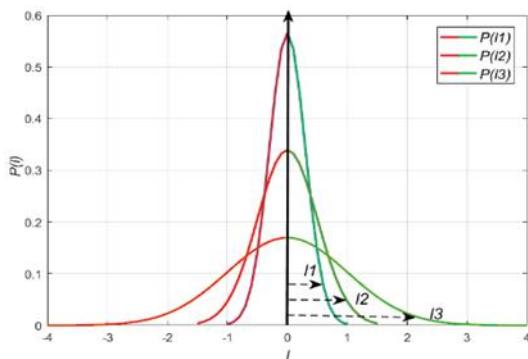


Рис. 2. График функции распределения  $P(l)$  для различных районов плавания

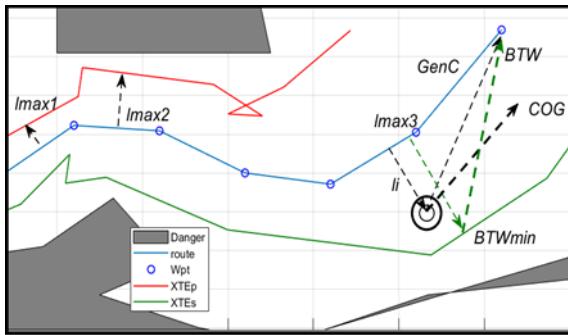


Рис. 3. Схема мониторинга СВМ, при следовании судна внутри коридора безопасности, ограниченного величинами  $[l_{min}, l_{max}]$ .

Мониторинга состояния НБП состоит в вычислении вероятности навигационной безопасности, которая сводится к расчёту попадания судна в момент времени внутрь области КБ:

$$f(F_{\text{НБП}}(l_i)) \rightarrow S_{\text{НБП}}(\vec{T}) \quad (15)$$

Распределение плотности следования судна внутри коридора безопасности подчиняется равномерному закону распределению:

$$F_{\text{НБП}}(l_i) = \int_{-\infty}^l f(l) dt = \begin{cases} 0, & l_i < l_{min}; \\ \frac{l_i - l_{min}}{l_{max} - l_{min}}, & l_{max} \leq l_i \leq l_{min}; \\ 1, & l_i \geq l_{max}. \end{cases} \quad (16)$$

где:  $l_i$  – текущее мгновенное значение перпендикулярного смещения судна от линии заданного пути.

Тогда вычисление состояния  $S_{\text{НБП}}(\vec{T})$  (вероятности) обеспечения НБП сводится к линейному преобразование функции равномерного распределения  $F_{\text{НБП}}(l_i)$ :

$$S_{\text{НБП}}(l_i) = (l_{max} - l_{min}) f_{\text{ЗПР}_{\text{НБП}}}(l_i(l_{max} - l_{min}) + l_{min}) = \\ = \begin{cases} 1, & l_i \in [0, 1]; \\ 0, & l_i \notin l_i \in [0, 1]. \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом, если САМК определила выход судна за пределы КБ (опасное), то подаётся управляющий сигнал на исполнительное устройство (ДРК), действие которого направлено на скорейшее приведение судна в безопасное состояние.

### 2.3 Параметры мониторинга и контроля предупреждения столкновений судов. Система предупреждения столкновений судов (СПСС)

Процесс предупреждения столкновений судов (ПСС) в современном судовождении расценивается с позиций «обычной и хорошей морской практики»,

необходимость в которых возникает в результате появления опасного сближения двух или нескольких движущихся судов. На каждом этапе ПСС применяются различные методы и технические средства. Задачей мониторинга является наблюдение и определение опасности столкновения с судами, распределенными в некотором географическом районе плавания.

Опасно сближающееся судно должно рассматриваться как элемент ПСС, и все возможные ограничения и изменения его состояния должны учитываться при выполнении операции расхождения судов. Мониторинг ПСС должен обеспечивать последовательную цикличность действий: обнаружение цели → идентификация → определение опасности столкновения. Обнаружение целей может осуществляться при помощи радиолокатора (РЛС) или по показаниям Автоматической идентификационной системы (АИС) – специально предназначеннной для использования на судах при решении задач предупреждения столкновений, а также для автоматического обмена информацией с другими судами и компетентными береговыми службами навигационной, рейсовой и другой информацией, связанной с безопасностью. После обнаружения и идентификации целей возникает этап определения элементов сближения: дистанции, пеленга и его изменения, курсового угла, ракурса, дистанции и времени кратчайшего сближения, наличия ограничивающих факторов и т. д. Затем определяется опасность столкновения. Она существует, если: пеленг на встречное судно не изменяется ( $\Delta\Psi = const.$ ), кратчайшее расстояние ( $D_{kp}$ ) при расхождении не превышает длины судна –  $L$  (CPA) или времени ( $\tau$ ) для расхождения судов недостаточно (TCPA).

Для избежания опасности столкновения расхождение судов должно быть обеспечено наличие свободного пространства вокруг судна и запасом глубины под килем, в пределах которых, судно может беспрепятственно маневрировать и предпринимать действия для избежания столкновений. Следовательно, перед каждым судном ставится задача поиска минимального пространства, обеспечивающего его безопасность. В МППСС-72 [2] таким критерием является термин «*Sufficient Sea-Room*» (SSR) с переводом на русский язык – «достаточное водное пространство». Этот термин означает не только свободу маневрирования на воде, но и отсутствие ограничений под водой. Его можно представить как объем, необходимый судну для маневрирования, как скоростью (активным торможением), так и изменением курса с глубинами, существенно не влияющими на маневренные характеристики судна:

$$SSR = D_{stop} \times D_u \times H \quad (18)$$

где  $D_{stop}$  – тормозной путь судна;  $D_u$  – расстояние, бокового смещения судна;  $H$  – проходная осадка судна.

Не маловажное значение для ПСС и безопасного плавания имеет понятие множества состояний окружающей среды:  $E = \{e, e_1, \dots, e_i, \dots, e_n\}$

Предметом ПСС всегда является окружающая среда или как сформулировано в МППСС-72 с набором «условий и обстоятельств плавания». Среди условий плавания могут быть: открытое море, узкости, проливы, СРД, ограниченная видимость,

скорость и любые другие гидрологические, метеорологические параметры. Среди обстоятельств плавания могут быть существенные ограничения по организации и безопасности плавания (работоспособность и качество ТСС, узлов, механизмов и т.д.). Среда может оказывать значительное влияние на производство мониторинга. Для автоматического мониторинга чем сложнее «среда» из-за наличия множества объектов и опасностей, скорости сближения судов, тем сложнее идентифицировать суда или объекты и классифицировать ситуацию встречи. Для устранения подобного рода сбоев в автономном судовождении должны быть предприняты меры для решения «проблем динамической избыточности параметров». Таким образом, анализ параметров ПСС показывает, что для предупреждения столкновений судов образуются множества совокупностей параметров процесса в момент времени  $t$ , которые оказывают непосредственное и опосредованное влияние на процесс ПСС.

#### 2.4 Учет взаимовлияния компонентов

Значительной сложностью учета в разрабатываемой САМК непосредственного и опосредованного влияния взаимозависимых параметров в условиях неопределенности возникает в силу большого количества параметров во внутренней и внешней структуре и сложным характером этих взаимосвязей. Взаимовлияние компонентов многомерных временных рядов (МВР), комплексно характеризующих состояние судна предлагается отображать в виде непосредственного и опосредованного взаимовлияния всех компонентов многомерного временного ряда МВР с их различными временными лагами друг относительно друга. Исходя из формулы (2) воспользуемся формализованным представлением МВР [3]:

$$t \in \{1, \dots, T, \dots\} S_0 = \\ = \begin{cases} S_1^{(t)} F_1 \left( \varphi_{1,1} \left( s_1^{(t-1)}, \dots, s_1^{(t-L_1^1)} \right), \dots, \varphi_{1,N} \left( s_N^{(t-1)}, \dots, s_N^{(t-L_1^N)} \right) \right) \\ S_2^{(t)} F_2 \left( \varphi_{2,1} \left( s_1^{(t-1)}, \dots, s_1^{(t-L_2^1)} \right), \dots, \varphi_{2,N} \left( s_N^{(t-1)}, \dots, s_N^{(t-L_2^N)} \right) \right) \\ \dots \\ S_N^{(t)} F_N \left( \varphi_{N,1} \left( s_1^{(t-1)}, \dots, s_1^{(t-L_N^1)} \right), \dots, \varphi_{N,N} \left( s_N^{(t-1)}, \dots, s_N^{(t-L_N^N)} \right) \right) \end{cases} \quad (19)$$

где  $S_0$  – многомерный временной ряд;  $S_t = (s_1^{(t)}, s_2^{(t)}, \dots, s_N^{(t)})$  – временной «срез» МВР в  $t$ -й момент времени;  $s_j^{(t)}$  – значение  $j$ -го компонента МВР в  $t$ -й момент времени;  $L_j^{(i)}$  – максимальное значение временного лага  $j$ -го компонента относительно  $i$ -го;  $\varphi_{i,j}$  – оператор для учета взаимовлияния между  $j$ -м и  $i$ -м компонентами МВР;  $F_i$  – преобразование для получения  $s_i^{(t)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  – число компонентов МВР.

Предлагаемое формализованное представление МВР иллюстрирует возможность учета непосредственного и опосредованного

взаимовлияния факторов (компонентов МВР) относительно их различных временных лагов.

### 3. Постановка проблемы автоматического мониторинга в САМК

Сложность решения ЗПР<sub>СБС</sub> при разработке САМК заключается в том, что в задачах ЗПР<sub>ВВ</sub>, ЗПР<sub>НБП</sub>, ЗПР<sub>ПСС</sub> параметры, показатели качества, критерии, точность измерения параметров, временные интервалы измерений совершенно разные. Исторически мониторинг параметров судна, в таких условиях, всегда рассматривался разобщенно – по подсистемам судна, без общего (системного) мониторинга. В целом мониторинг параметров для решения задач (1) это – мониторинг реального времени управляющих и управляемых подсистем судна в условиях негативного воздействия окружающей среды и других судов, распределенных в некотором географическом пространстве. В такой системе судоводитель, как адаптационный элемент, имея «неполную информацию по подсистемам» компенсировал недостатки системы часто по наитию, интуиции в условиях неточности, нечеткости или отсутствия информации о процессах обеспечения безопасности судовождения. Судоводитель оценивал имеющуюся информацию и давал оценку состояния судна. Однако такая «функциональная грубость» процесса мониторинга в человеко-машинной системе судовождения (ЧМС) для дальнейшего принятия решений позволяла поддерживать уровень аварийности флота на «некотором» всех устрашающих уровне безопасности». Для автономного судна такой подход совершенно не приемлем. Здесь необходимы модели мониторинга, предназначенные для последующего анализа и прогнозирования, в которых прогнозируемый временной ряд зависит от факторов, влияющих непосредственно или опосредованно [3].

Приведем всего лишь один пример: в отличие от принятых в МППСС-72 критериев возможности маневрировать (судно управляемо или неуправляемо), на практике средства управления судном могут находиться во время эксплуатации в одном из трёх состояний: «исправно и работоспособно», «неисправно, но работоспособно» и «неисправно и неработоспособно». Следовательно, в целом речь идет о гораздо значительном разнообразии многопараметрических процессов со множеством коррелированных параметров во внутренней и во внешней структуре САМК. А значит главная проблема связана с разработкой САМК связана с усилением роли факторов сложности в проектируемых автономных системах судовождения. Под проблемой сложности в автономном судовождении следует понимать: структурную сложность, сложность функционирования, сложность принятия решений и выбора сценариев, сложность их формального описания и моделирования.

#### 3.1 Задачи Автоматического мониторинга и контроля

Анализ задач разрабатываемой САМК позволяет сделать вывод о том, что безопасность судна достигается комплексным управлением во внутренней и внешней среде по результатам

мониторинга, прогнозирования и планирования поведения судна [4].

Задачи мониторинга и контроля для обеспечения безопасности подсистем внутренней структуры судна (ЗПР<sub>ВБ</sub>) направлены на наблюдение и контроль за техническим и функциональным состоянием внутренней структуры судна (неисправности, поломки, снижение мощности и т.д.). Такой подход сводится к разработке процедур сбора, обработки и анализа данных, информации и знаний, при которых обнаружение, локализация и ликвидация сбоев и отказов элементов и подсистем внутренней структуры судна будет происходить значительно раньше, чем станут проявляться возможные последствия указанных неисправностей. В этом состоит задача синтеза технологий проактивного (упреждающего) мониторинга и управления внутренней структурой судна, которые можно рассматривать как перспективные технологии управления сложностью (complexity management) [5].

Во внешней среде (ЗПР<sub>ПСС</sub> и ЗПР<sub>НБП</sub>) безопасность достигается комплексом управлений судном по взаимоотношению с «природой» и другими судами «с группой судов» (посадки на мель, столкновения с судами и другими плавающими объектами).

Для обеспечения внутренней и внешней безопасности судна предполагается декомпозиция глобальной цели (см. формулу 1) на множество ситуационных целей и разделения многообразия движения судна на ряд режимов, которые выбираются в управляющей подсистеме.

### 3.2 Задача реконфигурации в САМК

Технологически процессы ПСС и НБП не совместимы, а значит и задачи безопасности в них имеют разные цели и решаются раздельно. Добиться решения этих задач возможно реконфигурацией ЗПР<sub>СБС</sub> на:

$$(ЗПР_{ВБ}, ЗПР_{НБП}) \vee (ЗПР_{ВБ}, ЗПР_{ПСС}) \quad (20)$$

Задача реконфигурации ЗПР<sub>СБС</sub> заключается в поиске такого многоструктурного состояния (2) и такой последовательности (композиции) выполнения действий во времени, при которых обеспечивается перевод судна из опасного состояния в безопасное.

К настоящему времени рассматриваемый класс задач (20) исследован недостаточно глубоко. Исследования проблем создания и применения управляемых динамических (реконфигурируемых) систем (УДС) к настоящему моменту находятся в начальной стадии [6-28]. В судовождении исследования по УДС не проводились вовсе. Поэтому в организации управления судном для решения ЗПР<sub>СБС</sub>, в соответствии с разработками по УДС, потребуется технология реконфигурации САМК. Непосредственно в реконфигурации САМК должны быть реализованы элементы интеллектуального управления. Причем временной фактор в рассматриваемой системе является одним из наиболее важных.

Технологии мониторинга и контроля с реконфигурацией потребуют перехода от вычислителей с «жесткой» архитектурой, к кластерным компьютерам [29], архитектура которых может изменяться в процессе их функционирования. В результате появится возможность адаптации архитектуры вычислительной системы под структуру

решаемой им задачи, или, иными словами, создания в рамках универсальной вычислительной среды проблемно-ориентированных многопроцессорных структур. Это позволит минимизировать все непродуктивные временные затраты, связанные с организацией вычислительного процесса в системе, и тем самым обеспечить ее высокую реальную производительность, близкую к пиковой, в малом объеме и при малой потребляемой мощности.

### 3.3 Математическая постановка задачи реконфигурации

Идея УДС [6-9] заключается в использовании мультиагентного подхода и концепции активного подвижного объекта как агента. Предложено теоретико-множественное описание структурной динамики системы в виде «динамического альтернативного мультиграфа». Каждую из структур можно продемонстрировать с помощью мультиграфа:

$$G_\chi^t = \langle X_\chi^t, F_\chi^t, Z_\chi^t \rangle \quad (21)$$

где  $G_\chi^t$  - тип структуры,  $(\chi, \chi = 1, 2, \dots N)$  – индекс типа структуры системы,  $N$  - число рассматриваемых типов структур,  $t$  – момент времени из линейно упорядоченного множества  $T$  моментов времени изменения структуры системы  $t \in T$ ;

$X_\chi^t = \{x_{\chi l}^t, l \in L_\chi\}$  – множество элементов, входящих в структуру  $G_\chi^t$  (множество вершин мультиграфа),

$F_\chi^t = \{f_{\chi l}^t, l \in L_\chi\}$  – множество дуг, отражающих взаимосвязи элементов (вершин) во времени  $t$ ,

$Z_\chi^t = \{z_{\chi l}^t, l \in L_\chi\}$  – множество параметров, количественно характеризующих взаимосвязи элементов.

Многоструктурное состояние  $S_\chi$  с номером ( $\chi$ ) представлено как подмножество декартона произведения множеств вершин графов структур различных типов:

$$S_\chi \subseteq X_1^t \times X_2^t \times \dots \times X_N^t. \quad (22)$$

Тогда изменение структуры системы можно определить как множество допустимых операций отображения многоструктурных состояний системы друг на друга в момент времени  $t \in T$ :

$$\Pi'_{(\chi, \chi')} : S_\chi \rightarrow S_{\chi'} \quad (23)$$

а эволюцию структуры во времени – как последовательность (композицию) таких операций:

$$Y = \Pi_{(|T|, |T|+1)}^{t_{|T|}} \circ \Pi_{(|T|-1, |T|)}^{t_{|T|-1}} \circ \dots \circ \Pi_{(1, 2)}^{t_1} \quad (19)$$

где  $\circ$  означает композицию отображений, а  $|\cdot|$  – мощность множества. Таким образом, задача управления структурной динамикой (т. е. реконфигурации) сведена к поиску такой композиции  $Y^*$ , которая обеспечивает оптимальный по некоторому критерию перевод системы из начального многоструктурного состояния в целевое.

### 3.4 Процесс реконфигурации на гиперграфовой модели мониторинга и контроля

В структуре СБС (рисунок 1) одновременно находится множество подсистем и элементов (2), часть из которых предназначена для обеспечения безопасности, а другая часть оказывает негативное возмущающее воздействие и способствует возникновению опасностей. Для решения ситуационных задач (15) в САМК требуется структурная реконфигурация. Это приводит к

преобразованию функционального поведения своего судна (перевода из опасного в безопасное состояние). Реконфигурация САМК для решения (15) потребует перераспределения (компоновки) его подсистем в создавшихся ситуациях [30] с переводом части подсистем в пассивный режим, а другую часть подсистем наоборот в активный режим на некоторый промежуток времени ( $\Delta t$ ). Когда опасность миновала (после выполнения соответствующей задачи) подсистемы возвращаются в первоначальное состояние (активируются / дезактивируются).

Схематично покажем процесс (15) на гиперграфовой модели (рис.4) группируя  $n$  подсистем по их функциональному назначению в подграфы ( $H_1, H_2, H_3, H_4, \dots, H_i, \dots, H_n$ ), а затем произведем компоновку подграфов в граф схемы ( $G$ ).

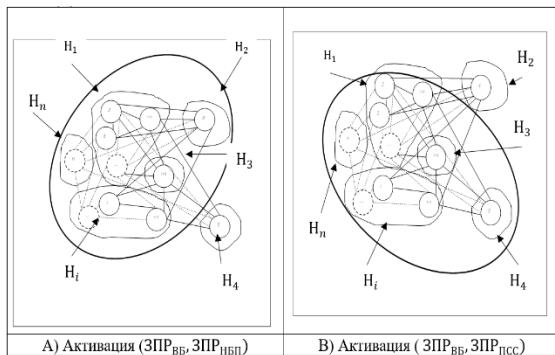


Рис. 4. Процесс реконфигурации на гиперграфовой модели подсистем группировкой на подграфы и активацией/дезактивацией САМК для решения ситуационных задач безопасности

Задача компоновки представляется множеством функций, описывающих процессы функционирования подсистем судна, где каждая из них реализует некоторую функцию  $f_i$ , а их множество определяет совокупность всех функций  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$ , выполняемых в соответствие с некоторым регламентом.

Регламент функционирования всех подсистем представляется гиперграфом  $G(S, U)$ , множество вершин которого отображают подсистемы ( $S$ ), а множество ребер ( $U$ ) — связи между ними. Требуется разбить исходный гиперграф на подграфы при выполнении следующих условий: все подграфы по-своему функциональному составу должны соответствовать реализации всех ЗПР<sub>СБС</sub>, причем реализация задач (ЗПР<sub>ВБ</sub>, ЗПР<sub>НБП</sub>) в (ЗПР<sub>ВБ</sub>, ЗПР<sub>ПСС</sub>) осуществляется едиными подсистемами управления и маневрирования судна. На рисунке 3 покажем совокупность подсистем в виде гиперграфовой модели. Произведем группировку подсистем в соответствии функциональным назначением в подграфы ( $H_1, H_2, H_3, H_4, \dots, H_i, \dots, H_n$ ) и определим условия активации/дезактивации САМК для решения ситуационных задач: А) (ЗПР<sub>ВБ</sub>, ЗПР<sub>НБП</sub>) и В) (ЗПР<sub>ВБ</sub>, ЗПР<sub>ПСС</sub>). Появление опасности(ей) во внешней структуре САМК является триггером, который запускает процессы компоновки (активации и дезактивации подсистем).

Анализ параметров СБС был показан в п.п. 2.1, 2.2 и 2.3, определены наиболее значимые факторы (компоненты МВР). Для обнаружения опасностей в САМК возможно использование статистических инструментов для контроля параметров во

внутренней и внешней среде: для независимых показателей - стандартные карты Шухарта [31], для коррелированных – методы и алгоритмы, основанные на применении многомерной статистики Холтеплинга и обобщенной дисперсии [32]. По результатам наблюдения и контроля параметров – выхода за пределы диапазонов их нормальной эксплуатации - определяют наличие опасности в САМК. Возможный способ реконфигурации САМК можно предложить следующим образом: введем обобщенный вектор структуры [10-11] одной из рассматриваемых подсистем  $\gamma_i \in \mathbb{R}^n$ , состоящей из элементов  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ , при этом, если наблюдается опасность, то подсистема  $S_i$  находится в активном режиме,  $\gamma_i = 1$ , а если  $\gamma_i = 0$ , то в пассивном режиме. Реконфигурацию системы описывает вектор  $y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T$  для каждого элемента которого определены пороговые значения  $\tilde{\gamma}_i$ , такие что если  $\gamma_i = 1$ , если  $y_i(t) > \tilde{\gamma}_i$  и  $\gamma_i = 0$ , если  $y_i(t) < \tilde{\gamma}_i$ . Таким образом данный способ позволяет добиваться реконфигурации параметров САМК для решения задач безопасности судовождения и перевода судна из опасного в безопасное состояние.

### Заключение

В работе кратко рассмотрено описание СБС ее подсистем, событий, явлений, процессов. Рассмотрено множество показателей в разрабатываемой САМК. Поскольку в СБС могут возникать ситуации, нарушающие безопасность системы как во внутренней, так и во внешней среде, то естественно, возникает необходимость мониторинга и контроля прежде всего функциональных параметров подсистем. Параметры подсистем позволяют формировать состояние СБС в целом. Проанализировав типы измеряемых параметров, можно все их свести к множеству значений в виде интервалов (диапазонов), где выход за пределы их нормальных значений будут свидетельствовать о необходимости принятия надлежащих действий по переводу судна из опасного в безопасное состояние. Характеризуя мониторинг параметров в САМК, можно отметить, что это – мониторинг реального времени параметров управляющих и управляемых подсистем судна, параметров негативного воздействия окружающей среды и параметров других судов, распределенных в некотором географическом пространстве. Мониторинг представляет собой значительное разнообразие многопараметрических процессов со множеством коррелированных параметров во внутренней и во внешней структуре СБС. В связи с этим возникает главная проблема связанная с разработкой САМК, которая связана с усилением роли факторов сложности для проектируемых автономных систем судовождения. Задачи мониторинга для обеспечения безопасности подсистем внутренней структуры судна направлены на наблюдение и контроль за техническим и функциональным состоянием внутренней структуры судна. Во внешней среде мониторинг безопасности судна определяется комплексом управлений судном по взаимоотношению с «природой» и другими судами («с группой судов»). Здесь возникает проблема автоматического мониторинга, которую предлагается решаемая путем реконфигурации

структуры САМК - композицией выполнения операций во времени, при которых обеспечивается перевод из заданного в требуемое многоструктурное макросостояние для решения той или иной ситуационной задачи. Это достигается активацией или дезактивацией подсистем мониторинга и оценивания параметров подсистем (опасное или безопасное состояние).

Исследования проблем создания и применения управляемых динамических (реконфигурируемых)

систем к настоящему моменту находятся в начальной стадии. В судовождении такие исследования не проводились вовсе. Поэтому работы по разработке технологий реконфигурации САМК являются весьма актуальными в области общего автоматического мониторинга в судовождении и будут крайне востребованными в ближайшие годы.

### Литература

1. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
2. МППСС - 1972. Международные правила предупреждения столкновений судов в море, 1972 г. (МППСС-72). 5-е издание
3. Борисов В. В., Луферов В. С. Метод многомерного анализа и прогнозирования состояния сложных систем и процессов на основе нечетких когнитивных темпоральных моделей // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 1-23. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10201.
4. Симанков, В.С. Основные методологические аспекты организации и функционирования систем поддержки принятия решений безопасности судовождения [Текст] В.С. Симанков, В.В. Астреин //Эксплуатация морского транспорта № 2(79).— Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2016. – С. 56-64.
5. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. — М.: Наука, 2006. – 410 с.
6. Соколов Б.В., Малюгин К.А. Комплексное моделирование процессов управления структурной динамикой информационной системы // Информационно-управляющие системы. 2003. № 2–3. С. 19–29.
7. Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Содержательное и формальное описание проблемы структурно-функционального синтеза и управления развитием информационной системы наземно-космического мониторинга // Труды СПИИРАН. 2013. Т. 5, № 28. С. 82–106.
8. Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов / А.Ю. Кулаков, А.Н. Павлов, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 596–603.
9. Павлов А.Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Труды СПИИРАН. 2013. № 5 (28). С. 143–168.
10. Кириллов А.Н. Метод динамической декомпозиции в моделировании систем управления со структурными изменениями // Информационно-управляющие системы. 2009. № 1 (38). С. 20–24.
11. Кириллов А.Н. Динамические системы с переменной структурой и размерностью // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 3. С. 23–28.
12. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с
13. Wonham W.M., Cai K., Rudie K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems: A Brief History // Annual Reviews in Control. Elsevier, 2018. Vol. 45, pp. 250–256.
14. Wonham W.M., Cai K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Cham: Springer, 2018. 502 p.
15. Амбарцумян А.А. Сетецентрическое управление на сетях Петри в структурированной дискретно-событийной системе // Управление большими системами. 2010. Т. 30.1. С. 506–535.
16. Control Reconfiguration of Discrete Event Systems with Dynamic Control Specifications / R. Sampath, H. Darabi, U. Buy, J. Liu // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. IEEE, 2008. Vol. 5, no. 1, pp. 84–100
17. A High-Level Net for Modeling and Analysis Reconfigurable Discrete Event Control Systems / A. Kheldoun, K. Barkaoui, J. Zhang, M. Ioualalen // Computer Science and Its Applications. Springer, 2015, pp. 551–562.
18. Дубинин В.Н. Асинхронное моделирование NCES-сетей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2009. № 2 (10). С. 3–14
19. Hu X., Zeigler B.P., Mittal S. Variable Structure in DEVS Component-Based Modeling and Simulation // Simulation. 2005. Vol. 81, no. 2, pp. 91–102
20. Fleming, W.H., Richel R.W., 1975. Deterministic and stochastic optimal control. Springer-verlag, Berlin, New York.
21. Intelligent Control Systems: Theory and Applications / Eds. M.M. Gupta, N.K. Sinka. N.Y.: IEEE Press, 1996.
22. Napolitano M.R., Swaim R.L. An Aircraft Flight Control Reconfiguration Algorithm // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., 1989, pp.323-332.
23. Russell, S.J., Norvig, P., 1995. Artificial Intelligence: A Modern Approach. PrenticeHall, Inc., A Simon & Schuster Company, Upper Saddle River, New Jersey. 16. Shannon, R.E., 1975. Systems Simulation. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
24. Simulation and Model-Based Methodologies: An Integrate View/Ed. by T.I. Oreu, B.P. Zeigler, M.S. Elzas: NATO Series (F), Vol.10 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1984.
25. Соколов Б.В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. — МО, 1992.
26. Tsypkin, Y.Z., 1971. Adaptation and Learning in Automatic System. Academic Press. New York.
27. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления, 2001, № 1. — С.5-22, № 2 — С.5-21.

28. Yusupov R., Rozenwasser E., 1999. Sensitivity of Automatic Control Systems. CRS. Press, London, New York.
29. Гузик, В.Ф. Реконфигурируемые вычислительные системы: учебное пособие / Гузик В.Ф., Каляев И.А., Левин И.И. / под общей редакцией И.А. Каляева. Южный федеральный университет. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2016. – 472 с. ISBN 978-5-9275-1918-7
30. Зыков А.Г., Поляков В.И. Алгоритмы конструкторского проектирования ЭВМ. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 136 с
31. ГОСТ Р ИСО 7870-2-201 Национальный стандарт Российской Федерации Статистические методы Контрольные карты Часть 2 Контрольные карты Шухарта Стандартинформ
32. Клячкин, В. Н. 2011 Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса М.: Физматлит, 2011. — 196 с. — ISBN 978-5-9221-1361-8.

### References

1. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
2. MPPSS, 1972. Mezdunarodnye pravila predupreždenija stolknovenij sudov v more [International Rules of Preventing Collision at Sea], 1972 g. (MPPSS-72). 5-e izdanie
3. Borisov V. V., Luferov V. S. Metod mnogomernogo analiza i prognozirovaniya sostojanija slozhnyh sistem i processov na osnove nechetkih kognitivnyh temporal'nyh modelej. Sistemy upravlenija, svazi i bezopasnosti. [The method of multidimensional analysis and forecasting of the state of complex systems and processes based on fuzzy cognitive temporal models. Control, communication and security systems.] 2020. № 2. S. 1-23. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10201.
4. Simankov, V.S. Osnovnye metodologicheskie aspekty organizacii i funkcionirovaniya sistem podderzhki prinjatija reshenij bezopasnosti sudovozhdenija [The main methodological aspects of the organization and functioning of decision support systems for navigation safety] V.S. Simankov, V.V. Astrein. Jeksploatacija morskogo transporta № 2(79). [Operation of marine transport № 2(79)] Novorossijsk: RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2016. S. 56-64.
5. Ohtilev M.Ju., Sokolov B.V., Jusupov R.M. Intellektual'nye tehnologii monitoringa i upravlenija strukturnoj dinamikoj slozhnyh tekhnicheskikh ob'ektov. [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects] M.: Nauka, 2006. 410 c.
6. Sokolov B.V., Maljugin K.A. Kompleksnoe modelirovanie processov upravlenija strukturnoj dinamikoj informacionnoj sistemy. Informacionno-upravljajushchie sistemy. [Complex modeling of control processes of structural dynamics of an information system. Information and control systems.] 2003. № 2-3. S. 19-29.
7. Potrjasaev S.A., Sokolov B.V., Jusupov R.M. Soderzhatel'noe i formal'noe opisanie problemy strukturno-funktional'nogo sinteza i upravlenija razvitiem informacionnoj sistemy nazemno-kosmicheskogo monitoringa. Trudy SPIIRAN. [Substantial and formal description of the problem of structural and functional synthesis and management of the development of the information system of ground-space monitoring. Proceedings of SPIIRAN] 2013. T. 5, № 28. S. 82-106.
8. Metody, algoritmy i tehnologii rekonfiguracii bortovyh sistem malomassorazmernyh kosmicheskikh apparatov [Methods, algorithms and technologies of reconfiguration of onboard systems of small-sized spacecraft ]. A.Ju. Kulakov, A.N. Pavlov, S.A. Potrjasaev, B.V. Sokolov. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie. [News of higher educational institutions. Instrumentation.] 2018. T. 61, № 7. S. 596-603.
9. Pavlov A.N. Kompleksnoe modelirovanie strukturno-funktional'noj rekonfiguracii slozhnyh ob'ektov. Trudy SPIIRAN. [Complex modeling of structural and functional reconfiguration of complex objects. Proceedings of SPIIRAN] 2013. № 5 (28). S. 143-168.
10. Kirillov A.N. Metod dinamicheskoy dekompozicii v modelirovaniy sistem upravlenija so strukturnymi izmenenijami. Informacionno-upravljajushchie sistemy. [Method of dynamic decomposition in modeling control systems with structural changes. Information and control systems] 2009. № 1 (38). S. 20-24.
11. Kirillov A.N. Dinamicheskie sistemy s peremennoj strukturoj i razmernostju. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie. [Dynamic systems with variable structure and dimension. News of higher educational institutions. Instrumentation.] 2009. T. 52, № 3. S. 23-28.
12. Kaljaev I.A., Gajduk A.R., Kapustjan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravlenija v gruppah robotov. [Models and algorithms of collective control in groups of robots.] M.: FIZMATLIT, 2009. 280 s
13. Wonham W.M., Cai K., Rudie K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems: A Brief History. Annual Reviews in Control. Elsevier, 2018. Vol. 45, pp. 250-256.
14. Wonham W.M., Cai K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Cham: Springer, 2018. 502 p.
15. Ambarcumjan A.A. Setecentricheskoe upravlenie na setjah Petri v strukturirovannoj diskretno-sobytiynoj sisteme. Upravlenie bol'shimi sistemami. [Network-centric control on Petri nets in a structured discrete-event system. Management of large systems.] 2010. T. 30.1. S. 506-535.
16. Control Reconfiguration of Discrete Event Systems with Dynamic Control Specifications. R. Sampath, H. Darabi, U. Buy, J. Liu, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. IEEE, 2008. Vol. 5, no. 1, pp. 84-100
17. A High-Level Net for Modeling and Analysis Reconfigurable Discrete Event Control Systems, A. Kheldoun, K. Barkaoui, J. Zhang, M. Ioualalen, Computer Science and Its Applications. Springer, 2015, pp. 551-562.
18. Dubinin V.N. Asinhronnoe modelirovaniye NCES-setej. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki. [Asynchronous modeling of NCES networks. News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences] 2009. № 2 (10). S. 3-14
19. Hu X., Zeigler B.P., Mittal S. Variable Structure in DEVS Component-Based Modeling and Simulation. Simulation. 2005. Vol. 81, no. 2, pp. 91-102

20. Fleming, W.H., Richel R.W., 1975. Deterministic and stochastic optimal control. Springer-verlag, Berlin, New York.
21. Intelligent Control Systems: Theory and Applications, Eds. M.M. Gupta, N.K. Sinka. N.Y.: IEEE Press, 1996.
22. Napolitano M.R., Swaim R.L. An Aircraft Flight Control Reconfiguration Algorithm. Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., 1989, pp.323-332.
23. Russell, S.J., Norvig, P., 1995. Artificial Intelligence: A Modern Approach. PrenticeHall, Inc., A Simon & Schuster Company, Upper Saddle River, New Jersey.
16. Shannon, R.E., 1975. Systems Simulation. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
24. Simulation and Model-Based Methodologies: An Integrate View/Ed. by T.I. Oreu, B.P. Zeigler, M.S. Elzas: NATO Series (F), Vol.10 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1984.
25. Sokolov B.V. Kompleksnoe planirovanie operacij i upravlenie strukturami v ASU aktivnymi podvizhnymi ob#ektami. [Complex planning of operations and management of structures in automated control systems by active mobile objects.] MO, 1992.
26. Tsypkin, Y.Z., 1971. Adaptation and Learning in Automatic System. Academic Press. New York.
27. Vasil'ev S.N. Ot klassicheskikh zadach regulirovaniya k intellektnomu upravleniju. Teoriya i sistemy upravlenija [From classical problems of regulation to intelligent management. Theory and Control Systems], 2001, № 1. S.5-22, № 2 S.5-21.
28. Yusupov R., Rozenwasser E., 1999. Sensitivity of Automatic Control Systems. CRS. Press, London, New York.
29. Guzik, V.F. Rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy: uchebnoe posobie [Reconfigurable computing systems: a textbook] Guzik V.F., Kaljaev I.A., Levin I.I. pod obshhej redakcijej I.A. Kaljaeva. Juzhnyj federal'nyj universitet. Taganrog: Izdatel'stvo Juzhnogo federal'nogo universiteta, 2016. 472 s. ISBN 978-5-9275-1918-7
30. Zykov A.G., Poljakov V.I. Algoritmy konstruktorskogo proektirovaniya JeVM. [Algorithms of computer design.] SPb: Universitet ITMO, 2014. 136 s
31. GOST R ISO 7870-2-2011 Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii Statisticheskie metody Kontrol'nye karty Chast' 2 Kontrol'nye karty Shuharta Standartinform [National Standard of the Russian Federation Statistical methods Control cards Part 2 Control cards Shuhart Standartinform]
32. Kljachkin, V. N. 2011 Modeli i metody statisticheskogo kontrolja mnogoparametricheskogo tehnologicheskogo processa [Models and methods of statistical control of a multiparametric technological process] M.: Fizmatlit, 2011. 196 s. ISBN 978-5-9221-1361-8.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Вадим Викторович Астреин**, доктор технических наук, капитан дальнего плавания, профессор кафедры «Судовождение», государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

**Виктор Иванович Филатов**, аспирант кафедры «судовождение», государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Filatov\_viktor1994@mail.ru.

**Vadim V. Astrein**, Dr. Sci. (Eng)s, Master Marine, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

**Viktor I. Filatov**, graduate student of the Department of Navigation, Chief Officer, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Filatov\_viktor1994@mail.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.05.2022.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.05.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 22.05.2022.

**Научная статья**

УДК 621.391.26, 004.627, 932.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.025>

## **Когнитивный алгоритм трехмерного дискретного косинусного преобразования морских сюжетов**

Ш.С. Фахми<sup>1,2</sup> [shakeebf@mail.ru](mailto:shakeebf@mail.ru), Н.В. Шаталова<sup>1</sup> [shatillen@mail.ru](mailto:shatillen@mail.ru),

Е.В. Костикова<sup>3</sup> [kostikova.ev@mail.ru](mailto:kostikova.ev@mail.ru), О.В. Бородина<sup>1</sup> [borodinaov@gmail.ru](mailto:borodinaov@gmail.ru)

<sup>1</sup> Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), <sup>3</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

**Аннотация.** Сжатие видео представляет собой непрерывный процесс передачи по каналам связи для решения двух важных задач: оперативной доставки в реальном времени и сохранении качества сжатых визуальных данных. В последнее время вопросы сжатия становятся более требовательным с точки зрения производительности за счет увеличения вычислительной сложности и, следовательно, потребляемой мощности устройств передачи изображений. Дискретное косинусное преобразование (ДКП) является наиболее распространенным механизмом, используемым в области сжатия изображений. В данной статье приводится новый эффективный алгоритм реализации ДКП для сжатия видеинформации морских сюжетов с учетом свойств и высоты съемки. Эффективность алгоритма заключается в учете статистических свойств исходного сигнала изображений при вычислении коэффициентов ДКП. Приведены результаты моделирования предложенного алгоритма и показаны оценки информационных показателей: коэффициент сжатия, структурного сходства восстановленных изображений и СИГ/ШУМ по сравнению с стандартными методами сжатия.

**Ключевые слова:** Сжатие и восстановление изображений, 3D- АДКП, квантование, коэффициент сжатия, морские сюжеты.

**Для цитирования:** Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородина О.В. Когнитивный алгоритм трехмерного дискретного косинусного преобразования морских сюжетов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 185—192.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.025>

## **A cognitive algorithm for three-dimensional discrete cosine Transformation of marine images**

Shakeeb S. Fahmi<sup>1,2</sup> [shakeebf@mail.ru](mailto:shakeebf@mail.ru), Natalia V. Shatalova<sup>1</sup> [shatillen@mail.ru](mailto:shatillen@mail.ru),

Elena V. Kostikova<sup>3</sup> [kostikova.ev@mail.ru](mailto:kostikova.ev@mail.ru), Olga V. Borodina<sup>1</sup> [borodinaov@gmail.ru](mailto:borodinaov@gmail.ru)

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, <sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation, <sup>3</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

**Abstract.** Video compression is a continuous process of transmission over communication channels to solve two important tasks: operational delivery in real time and maintaining the quality of compressed visual data. Recently, compression issues have become more demanding in terms of performance due to increased computational complexity and, consequently, the power consumption of image transmission devices. Discrete Cosine transform (DCT) is the most common mechanism used in the field of image compression. This article presents a new effective algorithm for the implementation of DCP for compressing video information of marine scenes, taking into account the properties and height of the shooting. The effectiveness of the algorithm consists in taking into account the statistical properties of the original image signal when calculating the DCT coefficients. The results of modeling the proposed algorithm are presented and estimates of information indicators are shown: compression ratio, structural similarity of reconstructed images and SIG/NOISE compared to standard compression methods.

**Keywords:** Image compression and restoration, 3D-ADCT, quantization, compression ratio, marine scenes.

**For citation:** Shakeeb S. Fahmi, Natalia V. Shatalova, Elena V. Kostikova, Olga V. A cognitive algorithm for three-dimensional discrete cosine Transformation of marine images, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 185—192.

### **Введение**

Почти 70% поверхности земли покрыто океанами, внутренними реками и озерами. Развитие видеинформационных технологий и появление новых умных камер наблюдения на основе технологии «система на кристалле» привели к необходимости развивать средства комплексного

наблюдения, контроля и управление морскими судами, движением в акваториях для защиты интересов и поддержания национальной безопасности, а также к улучшению всенаправленного наблюдения для обеспечения ситуационной осведомленности в конкретных районах океана. Массовые видеозаписи с морского наблюдения требуют мониторинг и передачу в

режиме реального времени, что требует больших вычислительных ресурсов и создания новых высокопроизводительных систем захвата и передачи видеинформации [1].

Общество постепенно приспосабливается к переходу на полностью автоматизированные транспортные средства, такие как беспилотники, беспилотные транспортные средства и морские суда. Быстрое развитие информационных и коммуникационных технологий, таких как интернет вещей, большие данные и технологии связи, привело к росту спроса на новые методы и алгоритмы передачи с использованием свойств спектральных преобразований [2,3].

В целом, быстрое развитие цифровых камер наблюдения в составе технологий интеллектуального судоходства требует улучшенного компьютеризированного визуального восприятия поверхности океана. Однако современные средства и стандарты передачи видеинформации, такие как JPEG для статических изображений и MPEG для динамических сцен, использующее механизм компенсации движения для обработки видеопотока [4], недостаточно для обеспечения высокого качества передачи визуальных данных. Имеется много ключевых факторов, сопутствующих обработке морских сюжетов, которые необходимо решить, таких как:

1) Площадь объекта интереса. Наблюдение с больших высот приводит к факту, что площадь объекта интереса, в частности морское судно, уменьшается по мере увеличения высоты съемки. Следовательно, значимость качества требуемого объекта резко уменьшается и основной расход вычислительного ресурса занимает (в большинстве случаев) не нужный фон (рис. 1).

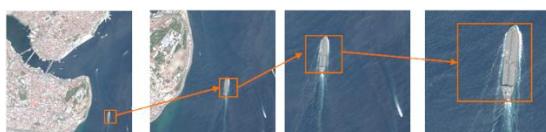


Рис. 1. Увеличение площади объекта с уменьшением высоты съемки

2) Рост детальности. Другим важным фактором наблюдения является расстояние от требуемого объекта, т.е. чем ближе съемка к объекту, тем больше детальности. Следовательно, качество и коэффициент сжатия видеинформации требуемого объекта становится критическим из-за высокой детальности. (рис. 2).

3) Скорость движения. Высокое движение объектов в видеопотоках приводит к появлению артефактов и искажению восстановленных изображений.



Рис. 2. Увеличение детальности с уменьшением высоты съемки

В данной статье рассматривается новый адаптивный алгоритм трехмерного дискретного косинусного преобразования морских сюжетов (3D-АДКП), позволяющий обеспечить оперативную передачу морских сюжетов в реальном времени с учетом выше указанных факторов.

### Описание алгоритма 3D- АДКП

Известные классические алгоритмы передачи видеинформации JPEG и MPEG, состоят из двух основных сложных процедур: двумерное (2D) ДКП и компенсации движения путём формирование соответствующих векторов движения объектов в последовательности изображений.

В предлагаемом 3D- АДКП алгоритме главное преимущество заключается в следующем:

1) замена процедуры формирования векторов движения на ДКП по времени, что приводит к многократному сокращению вычислительной сложности;

2) применение переменного размера блоков ДКП, как в пространственной, так и во временной области видеопотока [5], что позволяет увеличить коэффициент сжатия при сохранении качества передаваемых изображений.

Алгоритм сжатия и восстановления морских сюжетов 3D- АДКП включает следующие основные этапы:

1. *Прием и формирование последовательности кадров.* Достижения в области аппаратных технологий и цифровых камер привели к резкому росту визуальной информации, в частности на транспорте. Визуальные данные, такие как изображения и видео, составляют до 80% от общего объема интернет-трафика. Одновременно растущие требования к улучшению качества вынудили разработчиков интеллектуальных видеосистем наблюдения стремиться к предоставлению видео более высокого качества. Требования к более высокому качеству видео могут включать в себя новейшие технологии проектирования, на основе схем с программируемой логикой, более высокое пространственное разрешение, большие размеры дисплея, высокие динамические диапазоны (HDR) и высокую частоту кадров (HFR).

2. *ДКП.* Математические свойства 1D ДКП [6, 7] расширяются до третьего измерения. Прямой 3D-ДКП объема данных изображения с размерами NxLxM определяется следующими уравнениями:

$$F(u, v, w) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(l, m, n) \cdot C_{l,u,L} C_{m,v,M} C_{n,w,N},$$

где  $f(l, m, n)$  - значение пикселя с координатами  $l, m, n$  в пределах куба, а  $F(u, v, w)$  - коэффициент 3d ДКП в координатах  $u, v, w$  преобразованного куба. Величины  $K_{a,d}$  и  $C_{a,b,c}$  задаются уравнениями:

$$K_{a,d} = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{d}} & \text{если } a = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{d}} & \text{если } 1 \leq a \leq d - 1 \end{cases}, C_{a,b,c} = \cos \frac{\pi(2a+1)b}{2c}.$$

Обратное преобразование задается набором аналогичных уравнений, как описано ниже:

$$f(l, m, n) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} K_{u,L} \cdot K_{v,M} \cdot K_{w,N} \cdot F(u, v, w) \cdot C_{l,u,L} \cdot C_{m,v,M} \cdot C_{n,w,N},$$

где  $K_{a,d}$ ,  $C_{a,b,c}$ , как определено в уравнениях выше.

Преобразование может быть реализовано либо непосредственно с помощью быстрого алгоритма 3D-ДКП, подобного представленному в [6], либо путем последовательного применения трех одномерных ДКП к каждому измерению на основе свойства разделимости многомерного ДКП [7]. В данной статье предложен способ вычисления ДКП куба с использованием принципа разделимости по трем координатам  $l, m, n$  в пределах куба, при этом ДКП выполняется следующим образом:

$$C = D \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{1}{2\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\sqrt{2}} \end{bmatrix}.$$

Можно проверить, что предлагаемая матрица преобразования  $8 \times 8$ , ортогональна ( $C^{-1} = C' = T' \times D'$ ), где  $t$  обозначает операцию транспонирования матрицы. Матрица  $T$  выражается как произведение 3 матриц:

$$T = T_3 \times T_2 \times T_1,$$

где

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Следует отметить, что размеры куба ДКП определяются с учетом скорости движения и статистических свойств фона [8]. На практике все известные стандарты кодирования видеопотока применяют размеры куба равным  $8 \times 8 \times 8$  с целью обеспечения минимального искажение при относительно приемлемой сложности кодека.

В данной статье были использованы следующие размеры куба:  $4 \times 4 \times 4$ ,  $8 \times 8 \times 8$ ,  $16 \times 16 \times 16$ .

**3. Квантование.** Квантование полученных коэффициентов 3D ДКП рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Quantized 3D-ДКП}_{(i,j,k)} &= \text{Multi}_{(i,j,k)} \times \text{3D-ДКП} \\ &\quad \text{Coeff}_{(i,j,k)} / Q_{(i,j,k)} \\ &= \text{3D-ДКП Coeff}_{(i,j,k)} \times [\text{Multi}_{(i,j,k)} Q_{(i,j,k)}] \\ &= \text{3D-ДКП Coeff}_{(i,j,k)} / Q_{\text{New}}_{(i,j,k)}, \end{aligned}$$

где

$$Q_{\text{New}}_{(i,j,k)} = Q_{(i,j,k)} \text{ Multi}_{(i,j,k)}$$

новый квантованный куб.

Предложенный алгоритм позволяет увеличить числа нулевых коэффициентов ДКП благодаря адаптивному сканированию в зависимости от их расположения в матрице ДКП. Данный способ сканирования подробно рассмотрен в работе [7].

**4. Энтропийное кодирование.** Под энтропийным кодированием понимается процесс кодирования Хаффмана. Кодирование Хаффмана - это алгоритм, использующий кодовую таблицу переменной длины. Таблица определяется, на основе расчетной вероятности появления каждого возможного значения исходного символа (например, символа в файле). Принцип кодирования Хаффмана заключается в присвоении младших битов более часто встречающимся данным. Словарь, связывающий каждый символ данных с кодовым словом, обладает тем свойством, что ни одно кодовое слово в словаре не является префиксом любого другого кодового слова в словаре [4]. Например, в кодере JPEG кодирование Хаффмана комбинируется с кодированием длины серии и называется кодом Хаффмана с амплитудой пробега [4]. Этот код представляет количество нулей перед ненулевым коэффициентом и размер этого коэффициента. Затем за кодом следуют дополнительные биты, точно определяющие амплитуду и знак коэффициента [4]. Признаком конца блока является ЕОВ (End-Of-Block). Он кодируется при появлении последнего ненулевого коэффициента. Эта стратегия допускается в том редком случае, когда последний элемент блока  $8 \times 8$  отличен от нуля. В случае пустого блока, т.е. когда все коэффициенты низкочастотной области матрицы ДКП равны нулю, кодер устанавливает признак ЕОВ.

Алгоритм восстановления сжатых морских сюжетов включает те же этапы, что и процесс сжатия, только в обратном порядке.

### Математический аппарат 3D-АДКП

Пусть  $X$  - входной куб размером  $8 \times 8 \times 8$  пикселей, а  $Y_1, Y_2, Y_3$  - выходные данные 1D, 2D и 3D-АДКП соответственно. Применяя 1D АДКП к всем сторонам (пространственным и временным) куба, получаем [9]:

$$\begin{aligned} \forall k \in \{1,8\}: Y_{1(*,*,k)} &= (D \times T \times X'(*,*,k))' \\ Y_{1(*,*,k)} &= (D_{pp} \times T \times X_{(*,*,k)})' \\ Y_{1(*,*,k)} &= (X_{(*,*,k)} \times T') \times D_{pp}, \end{aligned}$$

где  $\times$  - обозначают поточечное умножение, а матрица  $D_{pp}$  определяется как:

$$D_{pp} = [\text{Diag}(D), \text{Diag}(D), \text{Diag}(D), \text{Diag}(D), \text{Diag}(D), \text{Diag}(D), \text{Diag}(D), \text{Diag}(D)].$$

Применяя 1D-ДКП к столбцам  $Y_1$ , получим:

$$\begin{aligned} \forall k \in \{1,8\}: Y_{2(*,*,k)} &= D \times T \times Y_{1(*,*,k)} \\ Y_{2(*,*,k)} &= D_{pp} \times (T \times Y_{1(*,*,k)}) \\ Y_{2(*,*,k)} &= D_{pp} \times (T \times X_{(*,*,k)} \times T') \times D_{pp}' \\ Y_{2(*,*,k)} &= (D_{pp} \times D_{pp}') \times (T \times X_{(*,*,k)} \times T') \end{aligned}$$

Можно определить матрицу  $S$  и куб  $M_{(i,j,k)}$  как:

$$\begin{aligned} S &= D_{pp} \times D_{pp}' \\ M_{(i,j,k)} &= T \times X_{(*,*,k)} \times T' \\ Y_{2(*,*,k)} &= S \times M_{(*,*,k)}. \end{aligned}$$

А матрицу  $C_j$  как:

$$\forall j \in \{1,8\}: C_j = [S(*,j), S(*,j), S(*,j), S(*,j), S(*,j), S(*,j), S(*,j), S(*,j)].$$

Куб  $Y_2$  будет переписан как:

$$\forall j \in \{1,8\}: Y_{2(*,*,j)} = C_j \times M_{(*,*,j)}.$$

В результате применения 1D-АДКП к временной оси  $z$  куба  $Y_2$ , получим:

$$\begin{aligned} \forall j \in \{1,8\}: Y_{3(*,j,*)} &= (D \times T \times Y_{2(*,*,j)})' \\ Y_{3(*,j,*)} &= (D_{pp} \times T \times Y_{2(*,*,j)})' \\ Y_{3(*,j,*)} &= (Y_{2(*,*,j)} \times T') \times D_{pp}' \\ Y_{3(*,j,*)} &= (Y_{2(*,*,j)} \times T') \times D_{pp}' \\ Y_{3(*,j,*)} &= (C_j \times M_{(*,*,j)} \times T') \times D_{pp}' \\ Y_{3(*,j,*)} &= (C_j \times D_{pp}') \times (M_{(*,*,j)} \times T') \\ Y_{3(*,j,*)} &= \text{Multij} \times 3D\text{-АДКП Coeff}_{(*,j,*)} \end{aligned}$$

при условии  $\forall j \in \{1,8\}: \text{Multij} = C_j \times D_{pp}'$   
 $3D\text{-АДКП Coeff}_{(*,j,*)} = M_{(*,*,j)} \times T'$ .

Куб Multi содержит все операторы умножения, необходимые для вычисления 3D-ДКП преобразования. Все результаты умножения в конце выполнения 3D-ДКП объединены и определяются в результате моделирования для количественной оценки вычислительной сложности алгоритмов передачи морских сюжетов. 3D-АДКП будет вычислен с использованием только матрицы  $T$ , что означает использование операций сложения.

Определим UQuantized куб ( $8 \times 8 \times 8$ ), который содержит неквантованые коэффициенты 3D-АДКП.

$$UQuantized_{3D\text{-ДКП}}(i,j,k) = \text{Quantized\_3D\text{-АДКП}}_{(i,j,k)} \times Q_{(i,j,k)}.$$

Далее необходимо применить 1D-ОАДКП к неквантованному кубу коэффициентов 3D ДКП:

$$IY_{2(*,*,*)} = ((T' \times D') \times UQuantized\_3D\text{-ДКП}_{(i,j,k)})' = (UQuantized\_3D\text{-АДКП}_{(i,j,k)} \times D_{pp}) \times T.$$

При применении 1D ОАДКП на  $IY_2$  получим:

$$\forall k \in \{1,8\}: IY_{1(*,*,k)} = (T' \times D') \times IY_{2(*,*,k)} = T' \times (D_{pp} \times IY_{2(*,*,k)}),$$

а при применении 1D ОАДКП на  $IY_1$  получим:

$$\begin{aligned} \forall k \in \{1,8\}: X_{(*,*,k)} &= ((T' \times D') \times IY_{1(*,*,k)})' \\ &= (IY_{1(*,*,k)} \times D_{pp}) \times T \\ &= (T' \times (D_{pp} \times IY_{2(*,*,k)})) \times D_{pp} \times T \\ &= T' \times (D_{pp} \times IY_{2(*,*,k)}) \times D_{pp} \times T \\ &= T' \times (D_{pp} \times IY_{2(*,*,k)}) \times T \\ &= T' \times M_{(*,*,k)} \times T \\ &= T' \times (T' \times M_{(*,*,k)})' \\ &= T' \times (T' \times M_{(*,*,k)}), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \forall k \in \{1,8\}: M_{(*,*,k)} &= (D_{pp} \times D_{pp}') \times IY_{2(*,*,k)} = S \times IY_{2(*,*,k)} \\ \forall j \in \{1,8\}: M_{(*,*,j)} &= C_j \times IY_{2(*,*,j)} \\ &= C_j \times (UQuantized\_3D\text{-ДКП}_{(*,*,j)} \times D_{pp}) \times T \\ &= (UQuantized\_3D\text{-ДКП}_{(*,*,j)} \times (C_j \times D_{pp})) \times T \\ &= Quantized\_3D\text{-ДКП}_{(*,*,j)} \times Q_{(*,*,j)} \times (C_j \times D_{pp}) \times T \\ &= (Quantized\_3D\text{-ДКП}_{(*,*,j)} \times (Q_{(*,*,j)} \times (C_j \times D_{pp}))) \times T. \end{aligned}$$

Куб квантования будет вычислен следующим образом:

$$\begin{aligned} UQuantized_{3D\text{-ДКП}} &= \text{Quantized\_3D\text{-АДКП}} \\ &\quad \times (Q_{(*,*,*)} \times (C_j \times D_{pp})) \\ &= \text{Quantized\_3D\text{-АДКП}} \times UQNew. \end{aligned}$$

Новая матрица квантования представляет собой:

$$UQNew_{(i,j,k)} = Q_{(*,*,k)} \times (C_j \times D_{pp}).$$

В предлагаемом алгоритме вместо того, чтобы позволить кодеру кодировать признак ЕОВ для пустых блоков вместе с массивом непустых блоков, все пустые блоки отфильтровываются, а информация о местоположении пустых и непустых блоков сохраняется в отдельном двоичном буфере. В этом буфере хранится 0 для пустых блоков и 1 для непустых блоков. В кодере JPEG компонент сжимается с использованием другой таблицы квантования по сравнению с компонентами  $C_b$  и  $C_r$ . Из-за различного характера их сжатия на данном этапе используются отдельные буфера для компонентов  $Y$ ,  $C_b$  и  $C_r$ . В конце все буфера для  $Y$ ,  $C_b$  и  $C_r$  объединяются.

### Результаты моделирования 3D-АДКП

Для измерения качества сжатой видеоинформации на этапе восстановления были использованы следующие объективные информационные показатели:

- Среднеквадратическая ошибка (СКО – англ. MSE – Mean Square Error) и важно отметить, что СКО

часто называют дисперсией ошибки квантования  $\sigma_q^2$ . MSE между исходным изображением  $f$  и восстановленным изображением  $g$ . В декодере определяется как:

$$MSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j,k} (f(j,k) - g(j,k))^2},$$

где сумма по  $j, k$  обозначает сумму по всем пикселям изображения, а  $N$  – количество пикселов в каждом изображении.

2) Пиковое отношение сигнал-шум (СИГ/ШУМ–PSNR). PSNR обратно пропорционально логарифму MSE между настоящим и сгенерированным изображением. СИГ/ШУМ между двумя изображениями, имеющимися 8 бит на пикセル или выборку в терминах децибел ( $dBs$ ), задается следующим образом:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{255^2}{MSE} \right)$$

3) Битовая скорость передачи (БСП) измеряется в количестве бит на пикセル (иногда число байт/пиксель). При низких скоростях передачи данных коэффициенты разложения изображения в ортонормированном базисе грубо квантуются. Поскольку многие коэффициенты установлены равными нулю, позиции нулевых и ненулевых квантованных коэффициентов сохраняются в двоичной карте значимости, которая записывается с помощью кодирования по длине цикла или более сложного алгоритма нулевого дерева. Теория скорости искажений неприменима по двум причинам. Во-первых, гипотеза квантования с высоким разрешением не выполняется, поскольку ячейки квантования велики. Во-вторых, нельзя рассматривать общий битовый бюджет как сумму битов, выделенных независимо для каждого коэффициента декомпозиции. Действительно, кодирование нулевых квантованных коэффициентов с помощью карты значимости является формой векторного квантования, которое связывает кодирование различных коэффициентов.

Чтобы оценить степень искажения, нельзя полагаться на точную стохастическую модель изображений. Пока еще не существует модели, которая включала бы в себя все разнообразие структур изображения, таких как нестационарные текстуры и края. Чтобы избежать этой трудности, часто на практике рассматривают сигналы как детерминированные векторы, коэффициенты разложения которых в базисе имеют параметризованный спад. Таким образом, скорость искажения вычисляется не с использованием среднего значения по ансамблю, но для каждого сигнала, ключевой результат показывает. Эта скорость искажения зависит главным образом от способности точной аппроксимации с небольшим количеством векторов, выбранных из сжатого изображения с низкой скоростью передачи данных.

4) Сложность устройств сжатия и восстановления изображений измеряется в число операции на пикセル или в число вентилей на пиксель.

5) Показатель структурного сходства (CC). CC – это метрика изображения, которая оценивает искажения яркости, контрастности и структуры изображения. SSIM определяется следующим образом:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}$$

где  $x$  и  $y$  – два сигнала изображения,  $\mu$  – среднее значение сигнала, а  $\sigma$  – стандартное отклонение сигнала:

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y), \\ C_1 &= (K_1 L)^2, \\ C_2 &= (K_2 L)^2, \end{aligned}$$

где  $L$  – динамический диапазон значения пикселя изображения, а  $K_1$  и  $K_2$  являются константами.

Часто на практике считается, что SSIM более объективен, чем PSNR, поскольку он направлен на приближение качества восприятия изображений путем моделирования некоторых характеристик зрительной системы человека.

Поскольку CC – это метрика, предназначенная для изображений, ее необходимо применять покадрово. Для обработки репрезентативного единичного значения к набору отдельных значений CC, полученных для разных кадров, применяется среднее арифметическое.

6) Коэффициент сжатия (Ксж.). Ксж. – показатель, который является основной метрикой измерения объема видеинформации. Это отношение числа бит, необходимых для ввода изображения к числу бит, требуемых для сжатого изображения. Ниже приведено уравнение степени сжатия [9]:

$$Ксж. = \frac{\text{Число бит исходного изображения}}{\text{число бит сжатого изображения}}$$

На рисунках 3–5 представлены результаты моделирования предложенного алгоритма при оценке: коэффициенты качества, CC СИГ/ШУМ изображений морских судов, полученных из камер, расположенных на разных высотах.

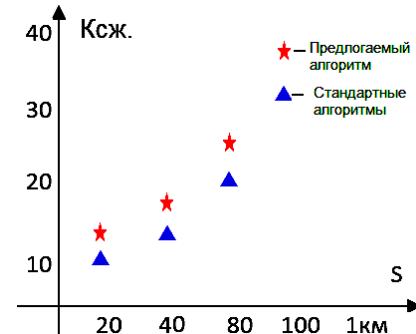


Рис. 3. Изменение значение коэффициента сжатия предложенного алгоритма по сравнению с обычным методом для различных высот

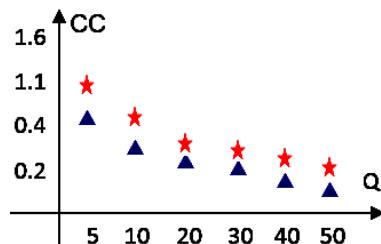


Рис. 4. Значения структурного сходства предложенного алгоритма по сравнению с стандартным методом для различных шагов квантования

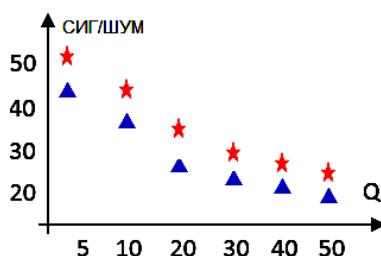


Рис. 5. Значения СИГ/ШУМ от шага квантования

Важно отметить, что оценка информационных показателей качества морских видеосистем наблюдения в данной статье выполняется при полном отделении объекта от фона [8].

На основе проведенного, в ФГБУН Институт проблем транспорта Российской академии наук (ИПТ РАН) анализа можно сделать следующие основные выводы:

1) Предложенный адаптивный алгоритм сжатия морских сюжетов превосходит стандартные известные методы (JPEG для случаев статических кадров и MPEG для случаев динамических сцен) по показателям: точности, битовой скорости (коэффициент сжатия) и сложности.

2) Выделение области интереса, в данном случае морских судов, от фона при обработке видеопотока, полученного из камер на разных высотах съемки, позволило эффективно распределить аппаратные и программные ресурсы для сохранения более высокого качества изображений.

3) Применение кубов переменного размера для вычисления ДКП в динамических сценах позволили разделить видеопоток на три типа: видео с высоким движением, с низким движением и видеопотоки без движения (рис. 6).

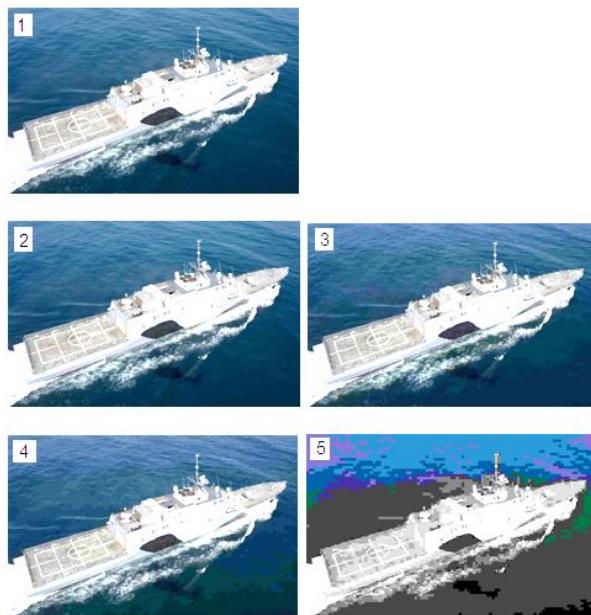


Рис. 6. Результаты оценки видеопотока с высоким движением: 1) исходный видеопоток; 2) Kсж.=20; 3) Kсж.=30; 4) Kсж.=40; 5) Kсж.=80.

### Заключение

Сжатие изображений предназначено для обеспечения более эффективного представления визуальных сигналов при сохранении высокого качества и растущей значимости видео высокой четкости.

В данной статье был предложен адаптивный алгоритм трехмерного дискретного косинусного преобразования изображений морской специфики и сравнение его эффективности с известными методами (JPEG и MPEG).

Отсутствие процедуры компенсации движения позволило уменьшить вычислительную сложность в 5-8 раз, а учет специфики и статистических свойств морских сюжетов при определении размера блоков, подвергающихся ДКП, позволили увеличить качество восстановленных сжатых видео на 10-15 % по сравнению с известными стандартами сжатия.

Проверка качества сжатия видеинформации морских сюжетов, получаемого в результате предложенного алгоритма ДКП, была выполнена с использованием объектно-ориентированного языка высокого уровня в среде C++ для Visual Studio.

Эксперименты для оценки степени сжатия были проведены для решения двух задач:

- 1) оценка с учетом высоты съемки;
- 2) оценка при высоком движении.

Предложенный алгоритм характеризуется переменным размером кубов, в отличие от известных методов. Результаты показали: увеличение коэффициента сжатия на 20-40%, повышение структурного сходства на 10-15 %, а СИГ/ШУМ на 10-20 %.

Формирование и передача высококачественной видеоинформации о движениях морских судов и отслеживание судов на видеозаписях наблюдения изменят безопасность передвижения на море.

### Литература

1. Nalamati, M.; Sharma, N.; Saqib, M.; Blumenstein, M. Automated Monitoring in Maritime Video Surveillance System. In Proceedings of the 35th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), Wellington, New Zealand, 25–27 November 2020; pp. 1–6. [<http://dx.doi.org/10.1109/IVCNZ51579.2020.9290533>].
2. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В. Транспортные видеосистемы на кристалле: методы и технологии проектирования. Монография. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. – 346 с.
3. Иванов А.В., Фахми Ш.С. Обработка видеоинформации в транспортных видеосистемах реального времени: Монография. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация ВУЗ, 2021. – 222 с.
4. Ричардсон Ян. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. – М.: Техносфера, 2005. – 368 с.
5. Li J, Takala, J, Gabbouj M, Chen H (2007) Variable temporal length 3D DCT-DWT based video coding, IEEE ISPCAS 2007, pp. 506–509. [<http://dx.doi.org/10.1109/ISPCAS.2007.4445935>].
6. Supriya Savant and Donald A. Adjeroh (2011) Balanced Multiple Description Coding for 3D DCT Video" IEEE transactions on broadcasting, vol . 57, No 4. [<http://dx.doi.org/10.1109/TBC.2011.2165237>].
7. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородина О.В. Исследование эффективности морской интеллектуальной видеосистемы обработки подводных изображений // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. № 1 (55). С. 133-140.
8. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Королёв О.А. Транспортная видеосистема отделения объекта от фона. В сборнике: Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2021. С. 217-224.
9. Anas Hatim, Said Belkouch, Moha M'rabet Hassani. Fast 8×8×8 RCF 3D\_DCT/IDCT transform for real time video compression and its FPGA. Implementation. International Journal of Advances in Engineering & Technology, May, 2014. Vol. 7, Issue 2, pp. 292-307. [<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.668.7239&rep=rep1&type=pdf>].

### References

1. Nalamati, M.; Sharma, N.; Sakib, M.; Blumenstein, M. Automated monitoring in a marine video surveillance system. In Proceedings of the 35th International Conference on Image and Vision Computing in New Zealand (IVCNZ), Wellington, New Zealand, November 25-27, 2020, pp. 1-6. [<http://dx.doi.org/10.1109/IVCNZ51579.2020.9290533>].
2. Fahmi Sh.S., Shatalova N.V., Kryukova M.S. Vydelenie konturov morskikh ob'ektor na osnove piramidal'norekursivnogo metoda predstavleniya izobrazhenij [Highlighting outlines of marine objects based on a pyramidal recursive image representation method]// Morskie i-intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 2-2 (44). P. 129–136.
3. Ivanov A.V., Fahmi S.S. Potokovaya obrabotka videoinformacii morskikh syuzhetov s ispol'zovaniem rasshirennoj instrukcii processora [Processing of video information in real-time transport video systems]: Monograph. - SPb.: Publishing and printing Association for UNIVERSITY 2021. S. 222.
4. Richardson Jan. Video encoding. And in H. 264 for MPEG-4 – new generation standards. Moscow: Technosphere 2005, 368 p.
5. Li J, Takala, J, Gabbouj M, Chen H (2007) 3D video encoding based on DCT-DWT with variable time length, IEEE ISPCAS 2007, pp. 506-509. [<http://dx.doi.org/10.1109/ISPCAS.2007.4445935>].
6. Supriya Savant and Donald A. Ajero (2011) Balanced Multiple description encoding for 3D video DCT" IEEE transactions on broadcasting, Volume 57, No. 4. [<http://dx.doi.org/10.1109/TBC.2011.2165237>].
7. Fahmi Sh.S., Kolesnichenko S.V., Kostikova E.V., Seliverstov S.A., Borodina O.V., Khalturin A.A., Terleev A.V. Estimation of the speed and complexity of spectral image transformation algorithms in marine surveillance systems// Marine intelligent technologies. 2021. No. 3-1 (53). pp. 171-178.
8. Fahmi Sh.S., Shatalova N.V., Korolev O.A. Transport video system for separating the object from the background. In the collection: Technologies for building cognitive transport systems. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 2021. pp. 217-224.
9. Anas Hatim, Said Belkouch, Moha M'rabet Hassani. Fast conversion of 8 8 8 RCF 3D\_DCT/IDCT for real-time video compression and its FPGA. realization. International Journal of Achievements in Engineering and Technology, May 2014 Volume 7, Issue 2, pp. 292-307. [<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.668.7239&rep=rep1&type=pdf>].

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Шакиб Субхиевич Фахми**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53.

Ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shakeebf@mail.ru

**Наталья Викторовна Шаталова**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shatillen@mail.ru

**Елена Валентиновна Костикова**, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

**Ольга Владимировна Бородина**, научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13, e-mail: borodinaov@gmail.ru

**Shakeeb S. Fahmi**, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation.

Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shakeebf@mail.ru

**Natalia V. Shatalova**, Ph.D. (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shatillen@mail.ru

**Elena V. Kostikova**, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St.Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

**Olga V. Borodina**, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: borodinaov@gmail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.05.2022.

**Научная статья**

УДК 004.9; 004.891; 681.5:658.588; 658.51; 658.562

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.026>

## **Риск-ориентированный подход к созданию программного обеспечения систем управления эксплуатацией морских технологических комплексов**

С.В.Латынцева<sup>2</sup> svlat@mail.ru, Д. А. Скороходов<sup>1,2</sup> skorohodda@mail.ru,

И. В. Степанов<sup>3</sup> ilstep@mail.ru, С.Н.Турасов<sup>4</sup> serniktur@yandex.ru

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), <sup>3</sup>ООО «Научно-технический центр «Технологии и безопасности», <sup>4</sup>АО «Всероссийский научно исследовательский и технологический институт электромашиностроения»

**Аннотация.** Развитие и эффективное использование современных морских технологических комплексов невозможно без создания систем управления эксплуатацией, деятельность которых направлена не только на эффективное и безопасное управление технологическим процессом, но и на обеспечение организации рациональной системы технического обслуживания и технического обеспечения функционирования. Системы управления эксплуатацией морских технологических комплексов представляют собой объективно сложную информационно-вычислительную систему, которая решает задачи управления готовностью и безопасностью, а также задачи управления качеством и техническим обслуживанием. Ключевым элементом системы управления эксплуатации является программное обеспечение, которое определяет качество, эффективность, результативность и безопасность функционирования морских транспортных комплексов. Существующие методы проектирования систем управления эксплуатацией и создания программного обеспечения этих систем не в полной мере учитывают возможности возникновения различных внешних и внутренних угроз, воздействие которых может нарушить работу системы управления эксплуатацией. В работе предложена оригинальная методика, основанная на комплексном применении совокупности методов анализа рисков, реализующая риск-ориентированный подход к разработке специального программного обеспечения систем управления эксплуатации. Результатами применения предлагаемой методики является создание безопасного и бездефектного специального программного обеспечения, а также существенное повышение качества программной документации систем управления эксплуатацией.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, анализ рисков, управление эксплуатацией, управление качеством

**Для цитирования:** Латынцева С.В., Скороходов Д. А., Степанов И.В., Турасов С.Н. Риск-ориентированный подход к созданию программного обеспечения систем управления эксплуатацией морских технологических комплексов. 2022. № 2 часть 1. С. 193—200.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.026>

## **The risk-based approach to creation of the software of management systems operation of sea technology complexes**

Svetlana V. Latyntseva<sup>2</sup> svlat@mail.ru, Dmitriy A. Skorohodov<sup>1,2</sup> skorohodda@mail.ru,

Ilia V. Stepanov<sup>3</sup> ilstep@mail.ru, Sergey N. Turusov<sup>4</sup> serniktur@yandex.ru

<sup>1</sup>Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, <sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, <sup>3</sup>LLC “Nauchno-tehnicheskiy centr “Tehnologii i Bezopasnosti” TB”, <sup>4</sup>JSC all-Russian scientific research design and Technology Institute of electrical engineering (VNITI EM)

**Abstract.** Development and effective use of modern sea technology complexes is impossible without creation of management systems operation which activity is directed not only to effective and safe production control, but also to providing the organization of rational system of technical maintenance and technical ensuring functioning. Management systems operation of sea technology complexes represent objectively complex information system which solves problems of management of readiness and safety and also tasks of quality management and technical maintenance. The key element of management system of operation is the software which defines quality, efficiency, effectiveness and safety of functioning of sea transport complexes. The existing design methods of management systems operation and creations of the software of these systems not fully consider possibility of different external and internal threats which influence can break system operation of management of operation. In work the original technique based on complex use of set of methods of risk analysis, implementing risk - the oriented development approach of the special software of management systems of operation is offered. Results of application of the offered technique is creation of the safe and defect-free special software and also essential improvement of quality of program documentation of management systems operation.

**Key words:** software, risk analysis, management of operation, quality management

**For citation:** Svetlana V. Latyntseva, Dmitriy A. Skorohodov, Ilia V. Stepanov, Sergey N. Turusov, The risk-based approach to creation of the software of management systems operation of sea technology complexes. 2022. № 2 part 1. P. 193—200.

## Введение

Вторая половина XX-го и начало XXI-го века характеризуется стремительным развитием техносферы, изменением характера угроз и опасностей для человека и окружающей среды, а также изменением роли и места человека в процессах контроля и управления техносферой [1, 2].

В результате развития нефтегазовой, нефтехимической, машиностроительной, химической, микроэлектронной и других отраслей народного хозяйства, а также серьезного изменения транспортной отрасли, сформировались и активно развиваются сложные технологические комплексы, существенными характеристиками которых является [1, 3]:

- высокая функциональная, структурная, топологическая и информационная сложность;
- высокая потенциальная опасность для персонала, окружающей природной среды, техносферы и населения;
- высокая степень автоматизации таких комплексов и связанное с этим изменение роли персонала в процессе их функционирования;
- наличие большого числа неопределенностей и вероятностный характер возникновения событий;
- рост сложности задач оценки состояния и управления, за счет нелинейного роста числа контролируемых параметров и возможных состояний систем и подсистем комплекса, и связанная с этим проблема своевременного и адекватного реагирования персонала на возникающие события.

## Функции и структура системы управления эксплуатацией

Под морским технологическим комплексом (МТК) понимается совокупность функционально взаимосвязанных технических и/или организационно-технических систем, объединенных общей целью функционирования и действующих в едином технологическом цикле (производства, управления, контроля и т.п.). Особенностью МТК является сложность алгоритмов функционирования, вероятностный характер поступления внешних воздействий и многоцелевой характер поведения различных элементов МТК и комплекса в целом.

В качестве примеров МТК можно привести морские перегрузочные комплексы, комплексы по переработке и перевалке опасных грузов, морские комплексы по добыче полезных ископаемых и другие.

Участие человека в работе МТК может проявляться как в форме непосредственного управления всеми или частью технических элементов комплекса, так и в опосредованной форме, через выполнение работ по техническому обслуживанию, ремонту и наладке отдельных элементов, обеспечивающих целостность комплекса, а, следовательно, обеспечивающих его способность выполнять поставленные задачи [3, 4].

При этом важным является то, что численность персонала МТК неуклонно снижается, а участие человека в процессах управления МТК все чаще сводится к функции пассивного наблюдения (контроля) за работой систем автоматики и телемеханики. Активное участие человека в процессе управления, как правило, требуется при

возникновении существенных отклонений параметров технологического процесса от установленных нормативных значений, при возникновении аварийных и чрезвычайных ситуаций.

В этой связи особенно актуальным становится создание интегрированных систем управления эксплуатацией (СУЭ). Деятельность таких систем направлена не только на управление технологическим процессом с обеспечением требуемого качества его результатов, но и на обеспечение безопасного функционирования МТК, за счет внедрения интегрированных процедур оценки опасностей (угроз), возникающих при функционировании МТК, организации рациональной системы технического обслуживания и технического обеспечения функционирования МТК [1, 4].

Управление эксплуатацией представляет собой комплекс мероприятий организационного и технического характера, направленных на достижение установленного или сохранение требуемого уровня готовности всех элементов МТК, в условиях наличия временных ограничений, а также ограничений на используемые в системе ресурсы [3].

К процедурам, обеспечивающим управление эксплуатацией можно отнести [4, 5]:

- планирование и организацию использования МТК и его составляющих по назначению;
- оценку состояния, обслуживание и ремонт технических средств (ТС), входящих в состав МТК;
- управление запасами ресурсов, обеспечивающих функционирование ТС;
- прогнозирование изменения состояния, выявление потенциальных отказов, предаварийных и аварийных состояний ТС.

СУЭ должна обеспечивать такую эксплуатацию отдельных ТС и МТК в целом, которая позволяет исключить возникновение отказов ТС, следствием которых стало бы нарушение качества и безопасности протекающих технологических процессов, а также исключение и/или локализация возможных аварийных или чрезвычайных ситуаций, являющихся последствием таких отказов.

Обобщенная структура СУЭ представлена на рис. 1.

Она включает четыре подсистемы: систему управления качеством (СУК), систему технического обеспечения (СТО), систему управления готовностью и систему управления безопасностью (СУБ). В рамках процесса управления готовностью следует различать процессы управления технической и организационной готовностью систем [1, 4, 5]. Соответственно, в составе СУЭ выделяются системы управления организационной (СУОГ) и технической готовностью (СУТГ). Указанные системы, обеспечивают выполнение четырех взаимосвязанных задач, отражающих различные аспекты эксплуатации сложной системы:



Рис. 1 – Функциональная структура системы управления эксплуатацией

- управление готовностью системы – обеспечение способности системы выполнять установленные функции в требуемом объеме;
- управление обеспечением безопасности (управление риском) – обеспечение безопасного для людей и окружающей среды функционирования системы;
- управление качеством – обеспечение соответствия процессов и результатов деятельности системы ожиданиям потребителей;
- управление техническим обеспечением – обеспечение системы всеми необходимыми для функционирования видами материальных ресурсов.

Для обеспечения эффективной (по различным критериям) и безопасной эксплуатации МТК должно достигаться применением комплекса автоматизированных систем, которые обеспечивают:

В качестве инструментальных средств, непосредственно решающих задачи обеспечения эффективной (по различным критериям) и безопасной эксплуатации МТК, выступают автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), которые обеспечивают применение МТК по основному назначению и управление МТК в нормальных и опасных режимах эксплуатации, а также безаварийный останов МТК при возникновении предпосылок аварии (СУБ).

#### Программное обеспечение (ПО) как источник рисков для СУЭ

В целом, СУЭ представляют собой информационно связанную совокупность аппаратно-программных средств, в которой решение основных функциональных задач достигается за счет широкого применения специального программного и развитого информационного обеспечения [1, 5, 6].

Современный этап развития техники и технологий характеризуется высоким удельным весом программируемых компьютерных систем, решающих задачи сбора и обработки данных, управления, контроля и мониторинга, диагностирования и т.п. Различные компьютерные системы существуют в неразрывном единстве и в комплексе обеспечивают достижение целей функционирования СУЭ по

предназначению, результативное и эффективное решение всех присущих системе задач.

Ключевой особенностью всех компьютерных систем является то, что решающую роль в реализации алгоритмов функционирования этих систем имеют программные средства, которые определяют функциональные возможности и эффективность соответствующей системы управления. Одновременно программные средства, в силу ряда причин, являются потенциальными источниками различных рисков, связанных с функционированием и безопасностью СУЭ. Это обусловлено, в первую очередь, сложившимися традициями и практикой разработки программного обеспечения, при котором вопросы своевременной идентификации и устранения рисков не являются приоритетом и зачастую выпадают из сферы внимания разработчиков программного обеспечения.

На рис. 2 показаны основные компоненты программного обеспечения СУЭ и основные виды рисков, связанные с соответствующими компонентами. В составе комплекса программного обеспечения выделяются: системное, общее, специальное и инструментальное ПО, используемые системой управления данные, а также программная документация, технические отчеты и протоколы.

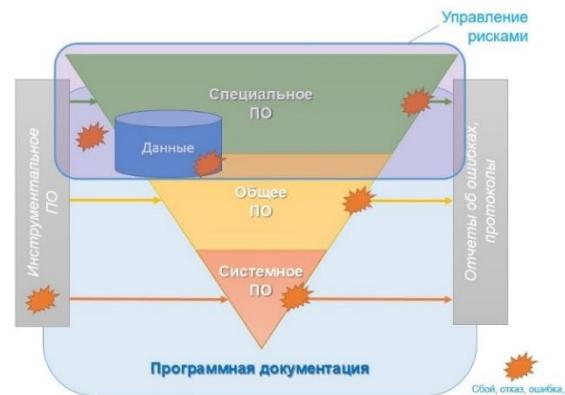


Рис. 2 – Структура программного обеспечения системы управления

Системное ПО представляет собой совокупность программных средств, обеспечивающих управление аппаратными средствами компьютерной системы и среду для функционирования общего и специального ПО. Специальное ПО системы управления эксплуатацией представляет собой совокупность специализированных для конкретной проблемной области программных средств, которые реализуют алгоритмы сбора, обработки, контроля, управления и противоаварийной защиты. К данным системе управления относится совокупность сведений о технологическом процессе и его параметрах, критериях и уставках управления, настройках и конфигурации программных средств и т.п., которые зафиксированы на машинных носителях, в форме, пригодной для постоянного хранения, передачи и обработки.

Программная документация представляет собой совокупность документов, содержащих информацию о разработке, изготовлении, испытаниях, эксплуатации и сопровождении программных средств, входящих в состав системы управления. В качестве особого класса программной документации

можно выделить технические отчеты и протоколы, которые содержат данные о результатах функционирования ПО, зафиксированных сбоях, ошибках и отказах.

Для дальнейшего анализа процессов создания ПО выделим основные особенности СУЭ как специализированной системы управления:

1) СУЭ – это функционально законченное изделие, образующее совокупность:

- программного кода;
- данных, предназначенных для управления компонентами системы управления;
- программной и технической документации;
- аппаратных средств системы управления.

2) СУЭ решает задачи в режиме реального времени, запаздывание и ошибки создают риски для безопасности.

3) СУЭ обладает высокой чувствительностью к опасным событиям, которая обусловлена:

- чувствительность к сбоям, отказам и ошибкам в программном коде;
- чувствительность к несоответствиям, неактуальности и ошибкам данных;
- чувствительность к дефектам и несоответствиям программной документации;
- чувствительность к влияниям от внешних информационных систем и сетей;
- чувствительность к нарушениям электропитания компонентов систем управления.

4) Ограниченные возможности разработчиков СУЭ управлять рисками некоторых компонентов системы.

### 3. Управление рисками программного обеспечения СУЭ

К основным видам рисков программного обеспечения СУЭ (рис. 2) можно отнести:

1) Риски, обусловленные сбоями, отказами, ошибками системного ПО.

2) Риски, обусловленные сбоями, отказами, ошибками общего ПО.

3) Риски, обусловленные сбоями, отказами, инструментального ПО.

4) Риски, обусловленные сбоями, отказами, ошибками специального ПО.

5) Риски, связанные с несоответствием данных (ошибки первого и второго рода, неактуальность и нерелевантность данных).

6) Риски, связанные с ошибками и несоответствием программной документации.

При создании СУЭ и ее отдельных составляющих (рис. 1), как правило, применяются стандартизованные решения по системному, общему и инструментальному ПО: операционная система, система управления базами данных, инструментальные средства для разработки специального ПО. А также используется типовая программная документация на соответствующие компоненты ПО.

В этих условиях разработчик системы имеет ограниченные возможности по управлению влиянием указанных компонентов на надежность, безопасность и качество проектируемой СУЭ. Наиболее актуальными методами снижения рисков, связанных с ПО, в этом случае являются:

- обоснованный выбор и управление конфигурацией системного, общего и инструментального ПО;

– применение типовых и проверенных решений по типу, комплектности и конфигурацией системного, общего и инструментального ПО;

– контроль наличия в используемом системном, общем и инструментальном ПО уязвимостей, документированных сбоев и ошибок посредством анализа данных изготовителей ПО, баз данных по уязвимостям ПО и своевременное обновление ПО;

– разработка решений по информационной безопасности, целостности данных и программ, контролю работоспособности системы управления.

В то же время, создатель СУЭ имеет возможность управления рисками, связанными со специальным ПО, данными и программной документацией системы управления. На рис. 3 показаны основные группы причин, которые могут приводить к возникновению различного рода опасных событий: сбоев, отказов, несоответствий.

Опыт показывает, что риски, связанные со специальным ПО, имеют вероятностную природу и обусловлены влиянием внешних (организация) и внутренних причин (процесс разработки). К числу внешних причин, относятся факторы, которые не свойственны специальному ПО, соответствующим действиям или операциям процесса проектирования, создания и применения специального ПО. Как правило, внешние причины обусловлены воздействием факторов внутренней среды организации (например, такими как корпоративная культура, компетентность и квалификация персонала, инфраструктура и т.д.) или внешними воздействиями на систему (например, сбои или отказы аппаратных средств, проблемы системного ПО, перебои электроснабжения, действия персонала и т.п.).



Рис. 3 – Источники возникновения рисков специального программного обеспечения

Обычно, при исследовании рисков, связанных со специальным ПО, фокус внимания обращается, в первую очередь, на выявление внутренних причин возникновения риска, которые связаны с собственными ошибками и конструктивными особенностями специального ПО; со спецификой управляемого технологического процесса; с внутренними особенностями применяемого оборудования, общего и инструментального ПО системы управления.

В свою очередь, внутренние причины являются следствием влияния на ПО общих или специальных причин. Под общей причиной понимается влияние на процессы (операции и действия) случайных факторов и событий, таких как отказы оборудования,

ПО и ошибки персонала, обусловленные вероятностной природой протекающих процессов. Под специальной причиной понимается влияние конструктивных и технологических причин, которые создают условия для возникновения отказов специального ПО и нарушения технологического процесса.

Специальные причины рисков, связанных со специальным ПО, могут быть обусловлены следующими факторами [6]:

- ошибки в определении и настройке параметров конфигурации специального ПО (нечеткое задание требований, неправильно выбраны типы данных или заданы уставки регулирования, срабатывания ПАЗ, неточность или неоднозначность описания действий персонала, некорректные требования к средствам измерения и т.п.) – так называемые «устранимые причины»;
- естественные механизмы, иногда называемые неустранимыми причинами (например, естественный износ оборудования, коррозия, утомляемость персонала), которые не были выявлены на этапе проектирования конструкции или технологии и, соответственно, не взяты под управление;
- вариации и отклонения «М-факторов» от требований технологического процесса: измерения (Measure), оборудование (Machine), сырье (Material), персонал (Man), технология (Method).

### **Управление качеством разработки и реализации специального ПО**

Качество программного обеспечения определяется как совокупность характеристик ПО, относящихся к возможности удовлетворять высказанные или подразумеваемые потребности всех заинтересованных лиц [7]. Можно выделить три ключевых аспекта качества [7] проектирования и создания специального ПО (рис. 4):

- качество взаимодействия с внешней средой – создание условий для разработки, определение и детальная формализация требований (в том числе: высказанных и подразумеваемых требований) потребителя ПО;
- качество функционирования и менеджмента организации-разработчика ПО (качество организации или внешнее качество) – создание условий для создания бездефектного ПО, соответствующего требованиям;
- качество процесса создания ПО (или внутреннее качество) – создание ПО, соответствующего требованиям на основании спецификаций требований потребителей.

Различаются понятия внутреннего качества, связанного с характеристиками ПО самого по себе, без учета его поведения. И внешнего качества, характеризующего ПО с точки зрения его поведения; и качества ПО при использовании в различных контекстах – того качества, которое ощущается пользователями при конкретных сценариях работы ПО [7].

Процесс управления качеством специального ПО включает следующие этапы:

- выявление и преобразование требований потребителя в характеристики качества программного продукта;

– определение ключевых процессов разработки программного обеспечения для включения в систему менеджмента качества организации;

– отбор ключевых характеристик качества процесса разработки программного обеспечения посредством FMEA-анализа;

– улучшение процесса разработки программного обеспечения посредством применения методов и средств менеджмента качества;

– оценивание разработанного программного обеспечения перед его поставкой.

При формулировании требований к специальному ПО систем управления производственных объектов необходимо учитывать, не только требования Заказчика в части функциональности, точности, защищенности быстродействия и т.д., но и требования Федеральных норм и правил РФ, которые устанавливают следующие дополнительные требования к специальному программному обеспечению систем управления:

1) При проектировании оборудования, управляемого программным обеспечением, должны учитываться риски, связанные с ошибками в программе.

2) При проектировании программного обеспечения должны быть:

– учтены риски срабатывания автоматических систем противоаварийной защиты;

– исключены риски, связанные с ошибками в программе (в алгоритме срабатывания).

3) Система противоаварийной защиты (ПАЗ), в том числе, должны выполнять автоматическую диагностику отказов, возникающих в системе ПАЗ и (или) в используемых ею средствах технического и программного обеспечения;

4) Все программные средства, предназначенные для применения в составе системы ПАЗ, подлежат обязательной проверке на соответствие требованиям, указанным в техническом задании.

5) Для отработки практических навыков пуска, плановой и аварийной остановки в типовых и специфических нештатных ситуациях, авариях – используются компьютерные тренажеры.

На рис. 4 представлена риск-ориентированная методика разработки специального ПО СУЭ.

Методика включает в себя семь этапов:

1) Формирование требований к специальному ПО.

2) Определение критериев качества специального ПО.

3) Идентификация возможных опасных событий (отказов) при создании и функционировании специального ПО.

4) Глубокое исследование проблем, приводящих к появлению отказов.

5) Выявление причин каждой проблемы.

6) Определение приоритетов действий по решению проблем.

7) Получение объективных данных о соответствии специального ПО требованиям.

В прямоугольниках, с номером, соответствующим каждому этапу, приведены данные об инструментах, которые используются для достижения целей на соответствующем этапе разработки ПО.



Рис. 4 – Риск-ориентированная методика управления качеством разработки ПО

Например, на первом этапе используется метод развертывания функции качества (QFD), а также ряд вспомогательных инструментов, таких как таблица «Голос потребителя», матрица парных сравнений, а также метод «Анализ опасности и работоспособности (HAZOP)». Результатом работы является формализованная совокупность требований к создаваемому программному продукту, выраженная, как правило в форме Задания на проектирование или спецификации.

На втором этапе определяются процессы и факторы, влияющие на качество создания специального ПО и используются такие инструменты как матрица тестирования критериев и матрица показателей качества.

На третьем этапе проводится анализ видов и последствий отказов (FMEA), в ходе которого идентифицируются все возможные несоответствия и отказы, которые могут возникнуть при создании и функционировании специального ПО. Для управления выявленными несоответствиями и отказами разрабатываются план управления и план реагирования на несоответствия.

Решение проблемы несоответствий достигается в процессе выполнения этапов 4-6. Для этого используется вопросный метод 5W&1H: «Что? Где? Когда? Кто? Какой? Как?», посредством которого выполняется углубленный анализ проблемы, а затем выполняется поиск корневых причин этой проблемы с использованием диаграммы Исиакава или метода «5 Почему». Важность, значимость, интенсивность и частота проявления каждой причины оцениваются с использованием экспертных оценок, а затем проводится Анализ Парето, итогом которого является ранжирование и выявление наиболее существенных причин возникновения проблемы.

Зафиксированные в ходе этапов 3-6 результаты служат основной для обработки результатов контроля качества (этап 7) и получения объективных данных о соответствии разрабатываемого специального ПО требованиям, зафиксированным на первом этапе. В качестве инструментов используются контрольные карты, диаграммы корреляции, диаграммы аффинности и другие инструменты для фиксации и анализа численных и качественных показателей и характеристик качества.

Описанная методика может применяться для анализа любого компонента ПО, в том числе, для

анализа данных и программной документации СУЭ. Описанная процедура системно реализуются на каждом этапе жизненного цикла программного продукта [6, 7]. При этом, конкретные методы и средства обеспечения качества процесса проектирования выбираются разработчиками с учетом специфики и области применения конкретного программного средства. Например, можно использовать следующие методы:

1) Полное тестовое покрытие кода, автоматическое тестирование, при котором:

– значительная часть ошибок может быть выявлена и устранена до передачи ПО потребителю (+);

– затраты труда и времени на создание тестов удваивают объем работ (–);

– невозможно выявить все возможные типы сбоев, ошибок (–).

2) Анализ опасностей и работоспособности (HAZOP), который проводится:

– применительно к оборудованию, работающему под управлением ПО (+);

– применительно к программным компонентам (+);

– требует высоких затрат труда на подготовку и проведение анализа (–);

– зависит от квалификации и опыта экспертов, участвующих в исследовании (–);

– обладает опасностью «пропуска» ошибок (–).

3) Автоматическая диагностика отказов ПО, которая:

– позволяет снизить риски влияния отказов ПО на оборудование и безопасность технологического процесса (+);

– приводит к усложнению архитектуры системы управления и архитектуры ПО (–);

– снижает общую надежность системы управления за счет введения в систему дополнительных компонентов (–).

Здесь знаками «+» и «–» отмечены, соответственно, положительные и отрицательные эффекты использования перечисленных инструментов.

## Заключение

В современном мире ПО является неотъемлемым и ключевым элементом любых систем в различных сферах деятельности и жизни человека. При этом, зачастую, ПО является источником скрытых и неявных рисков, оказывающее влияние на безопасность людей, техники, технологий и окружающей среды.

При исследовании рисков ПО важно понимать, что ПО это не только, и не столько программы, сколько данные и программная документация, которые совместно обеспечивают надежную и безопасную работу программируемых электронных и компьютерных систем и сетей передачи данных.

Методы анализа рисков ПО на сегодня детально не разработаны и, зачастую, сводятся исключительно к тестированию программного кода. Это приводит к подмене понятия качества ПО, когда вместо объективной демонстрации соответствия ПО установленным требованиям, разработчики говорят только о том, что «программа не имеет ошибок», а вопросы, связанные с качеством данных и программной документации, игнорируются.

Важно понимать, что при создании современных систем разработчик ограничен в своих возможностях по управлению рисками ПО. Это связано с тем, что возможность управлять рисками имеется только при создании заказного специального ПО, в то время как при использовании «коробочного» общесистемного,

специального и инструментального ПО разработчик получает ПО «какое есть» со всеми рисками. Во втором случае возможен только ограниченный контроль рисков и их частичное купирование средствами информационной безопасности.

### Литература

1. Степанов И.В. Проектирование систем управления эксплуатацией сложных технологических комплексов //Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XVI Всерос. научно-практической конф. РАРАН /ВМА, 3-5 апреля 2013 г. –М., РАРАН, 2013, Т. 4. С. 617-627.
2. Степанов И.В., Турусов С.Н. Информационные технологии проектирования систем управления эксплуатацией судов. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: Серия «Автоматизация и управления». -№ 1/2003. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003.
3. Ибадулаев В.А., Степанов И.В., Турусов С.Н. Принятие решений по управлению готовностью сложных систем //Всерос. научно-практическая конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности - 2002»: Сб. трудов, г. Санкт-Петербург, 9-11 апреля 2002 г., –СПб., 2002. -С. 117-123.
4. Степанов И. В. Управление качеством при эксплуатации сложных технических систем. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: Серия «Экономика и менеджмент организаций». –№ 1/2006. –СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. –С. 17-24.
5. Турусов С.Н., Степанов И.В., Скороходов Д.А. Системы управления готовностью технических средств морских подвижных объектов /под общей ред. д-ра. техн. наук., проф. С.Н.Турусова. –СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. –290 с.
6. Латынцева С.В., Степанов И.В. Проблема анализа рисков программных средств систем управления //Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXIV Всерос. научно-практической конф. РАРАН (31 марта – 3 апреля 2021 г.). –М., Изд. ФГБУ «РАРАН», 2021, Т. 2. С. 341-348.
7. Степанов И.В., Оларь В.Г. Повышение качества разработки программного обеспечения //Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды четырнадцатой Всерос. научно-практической конф. /ВМА, 5-7 апреля 2011 г. –СПб., 2011. Т. 4, С. 277-283.

### References

1. Stepanov I.V. Proektirovanie sistem upravleniya e`kspluataciej slozhny`x texnologicheskix kompleksov [Design of management systems operation of difficult technology complexes] //Aktual`ny'e problemy` zashchity i bezopasnosti: Trudy` XVI Vseros. nauchno-prakticheskoy konf. RARAN /VMA, 3-5 aprelya 2013 g. –M., RARAN, 2013, T. 4. S. 617-627.
2. Stepanov I.V., Turusov S.N. Informacionny'e texnologii proektirovaniya sistem upravleniya e`kspluataciej sudov [Information technologies of design of management systems operation of vessels]. Izvestiya SPbGE`TU «LE`TI»: Seriya «Avtomatizaciya i upravleniya». -№ 1/2003. –SPb.: Izd-vo SPbGE`TU «LE`TI», 2003.
3. Ibadulaev V.A., Stepanov I.V., Turusov S.N. Prinyatie reshenij po upravleniyu gotovnostyu slozhny`x system [Decision-making on management of readiness of complex systems] //Vseros. nauchno-prakticheskaya konf. «Aktual`ny'e problemy` zashchity i bezopasnosti - 2002»: Sb. trudov, g. Sankt-Peterburg, 9-11 aprelya 2002 g., – SPb., 2002. -S. 117-123.
4. Stepanov I. V. Upravlenie kachestvom pri e`kspluatacii slozhny`x texnicheskix system [Quality management at operation of complex technical systems]. Izvestiya SPbGE`TU «LE`TI»: Seriya «E`konomika i menedzhment organizacii». –№ 1/2006. –SPb.: Izd-vo SPbGE`TU «LE`TI», 2006. –S. 17-24.
5. Turusov S.N., Stepanov I.V., Skoroxodov D.A. Sistemy` upravleniya gotovnostyu texnicheskix sredstv morskix podvizhny`x ob`ektov [Management systems readiness of technical means of sea mobile objects] /pod obshhej red. d-ra. texn. nauk., prof. S.N.Turusova. –SPb.: Izdatel`sco-poligraficheskaya associaciya vy'sshix uchebny`x zavedenij, 2019. –290 s.
6. Laty`nceva S.V., Stepanov I.V. Problema analiza riskov programmny`x sredstv sistem upravleniya [Problem of risk analysis of software of management systems] //Aktual`ny'e problemy` zashchity i bezopasnosti: Trudy` XXIV Vseros. nauchno-prakticheskoy konf. RARAN (31 marta – 3 aprelya 2021 g.). –M., Izd. FGBU «RARAN», 2021, T. 2. S. 341-348.
7. Stepanov I.V., Olar` V.G. Povy`shenie kachestva razrabotki programmnogo obespecheniya [Improvement of quality of software development] //Aktual`ny'e problemy` zashchity i bezopasnosti: Trudy` chety rnadczatoj Vseros. nauchno-prakticheskoy konf. /VMA, 5-7 aprelya 2011 g. –SPb., 2011. T. 4, S. 277-283.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Светлана Владимировна Латынцева**, старший преподаватель кафедры Прикладной экономики, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5, e-mail: svlat@mail.ru

**Svetlana V. Latyntseva**, senior teacher of department of Applied economy, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: berater51@list.ru

**Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры Корабельных систем управления, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Илья Владимирович Степанов**, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник, ООО «Научно-технический центр «Технологии и безопасности», 197198, Санкт-Петербург, ул. Зверинская 22, лит. А, e-mail: ilstep@mail.ru

**Сергей Николаевич Турусов**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «ВНИТИ ЭМ», 196128, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 2, e-mail: serniktur@yandex.ru

**Dmitriy A. Skorohodov**, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Chief Researcher, Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Ilya V. Stepanov**, PhD, assistant professor (docent), Chief researcher LLC "Nauchno-tehnicheskiy centr "Tehnologii i Bezopasnosti" TB", lit. A, Zverinskaya str., Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, e-mail: ilstep@mail.ru

**Sergey N. Turusov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, General Director, JSC "VNIITI EM", 2, Blagodatnaya st., St. Petersburg, 196128, Russian Federation, e-mail: serniktur@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.05.2022.

**Научная статья**

УДК 504.062

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.027>

## **Формирование интеллектуальной системы мониторинга экологической обстановки Северного морского пути**

**Е.Ю. Кузнецова<sup>1</sup>** helhena@mail.ru, **А.В. Кириченко<sup>2</sup>** kirichenkoAV@gumrf.ru,

**М.Ю. Михайлова<sup>1</sup>** krab49@mail.ru, **С.Н.Турусов<sup>3</sup>**, serniktur@yandex.ru

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук;

<sup>2</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова <sup>3</sup>Акционерное

общество «Всероссийский научно исследовательский и технологический институт электромашиностроения» (ВНИТИ ЭМ)

**Аннотация.** Качество работы интеллектуальной системы экологической безопасности перспективной интеллектуальной мультимодальной транспортной системы Арктической зоны Российской Федерации зависит среди прочего от эффективности функционирования подсистемы сбора данных. Качество выходной информации определяет точность, полноту и достоверность данных об экологической обстановке. Морская транспортная система является основой арктического мультимодального транспортного коридора, а пункты внепортовой обработки грузов ее неотъемлемой частью. Объектом анализа исследования стали технологии выгрузки различных грузов на необорудованное побережье арктических морей и их негативные экологические последствия в контексте необходимости формирования адекватного физического слоя системы экологического мониторинга региона. Разработаны предложения по организации включения этих объектов, в качестве обособленного элемента в составе морской транспортной сети, в подсистему сбора данных интеллектуальной системы экологической безопасности. Сформулированы основные мероприятия для реализации разработанных предложений, проведен предварительный анализ технологической возможности их реализации.

**Ключевые слова:** мониторинг, экологическая безопасность, Арктика, прибрежная зона, выгрузка судов, обработка грузов, Северный морской путь.

**Для цитирования:** Кузнецова Е.Ю., Кириченко А.В., Михайлова М.Ю., Турусов С.Н. Формирование интеллектуальной системы мониторинга экологической обстановки Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 201—209.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.027>

## **Formation of an intelligent system for monitoring the environmental situation of the Northern Sea Route**

**Elena Y. Kuznetsova<sup>1</sup>** helhena@mail.ru, **Aleksandr V. Kirichenko<sup>2</sup>** kirichenkoAV@gumrf.ru

**Mariya Y. Mikhailova<sup>1</sup>** krab49@mail.ru, **Sergey N. Turusov** serniktur@yandex.ru

<sup>1</sup>Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences;

<sup>2</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

<sup>3</sup>Technology Institute of electrical engineering (VNITI EM)

**Abstract.** The quality of work the intellectual system of environmental safety of the promising intelligent multimodal transport system of the Arctic zone of the Russian Federation additionally depends on the efficiency of the data collection subsystem. The quality of information determines the accuracy, completeness and reliability of the data about the ecological situation. The maritime transport system is the basis of the Arctic multimodal transport corridor, and off-port cargo handling points are an integral part of it. The object of the analysis of the study is the technology of unloading cargo on the unequipped coast of the Arctic seas and their environmental consequences in the context of the need to form an adequate physical layer of the environmental monitoring system in the region. Proposals have been developed to include these items in the data collection subsystem of the intelligent environmental safety system. The main measures for the implementation of the developed proposals are formulated, a preliminary analysis of the technological feasibility of their implementation is carried out.

**Key words:** monitoring, environmental safety, Arctic, coastal zone, ship unloading, cargo handling, Northern Sea Route.

**For citation:** Elena Y. Kuznetsova, Aleksandr V. Kirichenko, Mariya Y. Mikhailova, Sergey N. Turusov Formation of an intelligent system for monitoring the environmental situation of the Northern Sea Route e // Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 201—209.

### **Введение**

Сегодня Арктику заслуженно называют Фондом будущих поколений. Россия вступила в эпоху второй волны освоения Арктики, означенной, не как

ранее, созданием добывающей отрасли, а развитием ресурсного, транспортного и природно-климатического потенциала. Стратегия перехода к устойчивому развитию северных территорий Российской Федерации (РФ) учитывает особое

положение единственной мировой державы, ведущей широкомасштабную хозяйственную деятельность за Северным полярным кругом в условиях исключительной уязвимости природы.

Для эффективного промышленного развития полярных регионов нашей страны необходимы надежные транспортные связи, обеспечивающие нормальные условия жизнедеятельности, ускоренное освоение месторождений полезных ископаемых, экспорт нефти и газа, развитие арктического транзита. Основным видом транспорта здесь был и продолжает оставаться морской флот, а арктическая морская транспортная система, являющаяся наиболее эффективным средством доставки разнообразных грузов и обеспечивающая перевозки по Северному морскому пути (СМП) имеет главное значение среди всех видов транспорта в Арктике.

В предыдущих работах авторов также отмечено, что важнейший этап пространственного развития Арктики – освоение акватории СМП и территорий, тяготеющих к нему, а создание системы экологической безопасности, интегрированной в инфраструктуру разрабатываемого Арктического интеллектуального мультимодального транспортного коридора (АИМТК) станет элементом сопровождения, связанных с освоением Арктики, процессов [1,2].

В современных условиях строительство и реконструкция объектов инфраструктуры Арктики разнообразны по масштабам, от вновь строящихся заводов и портов с сопутствующей инфраструктурой до отдельных городков и точечных объектов, но начинаются с первичной доставки грузов на развивающийся объект. В целом специфика доставки грузов в Арктике заключается в том, что регион повсеместно не оборудован должным образом портовой инфраструктурой. В будущем технология внепортовой выгрузки на необорудованное побережье, на ледовый припай и на мелководье прибрежной зоны предполагается к использованию в Арктическом регионе. Это связано с тем, что для новых объектов будет необходимо формирование портовой инфраструктуры, а для эксплуатируемых объектов подобная инфраструктура может быть объективно не предусмотрена.

Данное исследование является продолжением серии работ по созданию интеллектуальной системы экологической безопасности (ИСЭБ) перспективной интеллектуальной мультимодальной транспортной системы (ИМТС) Арктической зоны Российской Федерации (АЗ РФ). Целью статьи является разработка предложений по включению в физический слой подсистемы сбора информации ИСЭБ АИМТК пунктов внепортовой обработки грузов, как отдельного элемента системы экологического мониторинга, а также анализ технологической возможности реализации этих предложений.

### **Архитектура ИСЭБ для СМП**

Одним из основополагающих сегодня фактором развития АЗ РФ является антропогенная нагрузка на окружающую среду, снижение влияния которой

необходимо и возможно при создании комплексной программы экологического регулирования в регионе.

Исследования, посвященные обоснованию необходимости создания в районах тяготения к СМП интеллектуальной системы управления экологической безопасностью и формированию ее научно-теоретических основ, позволили сформулировать ряд выводов, обобщённо представленных далее [1,3].

Принципиальный подход к созданию системы управления экологической безопасностью должен учитывать различные аспекты вопроса глобального снижения негативного воздействия, среди них важную составляющую занимают традиционные биосферный и промышленный экологический мониторинг, и их совершенствование за счет использования перспективных технологий сбора и обработки данных. А основой региональной комплексной системы экологического регулирования может стать ИСЭБ СМП, интегрированная в инфраструктуру ИМТС АЗ РФ, что обуславливает тесная связь развития региона с развитием его транспортной системы.

Определена концепция реализации предложений – это использование мультимодального транспортного коридора (МТК) в качестве платформы сбора экологических данных.

Технология построения ИСЭБ предполагает встраивание во все ключевые транспортные инфраструктурные и частично в подвижные объекты АЗ РФ экологических датчиков и исполнительных устройств, с последующей передачей в базы данных для проведения расчетов и моделирования с целью поддержки принятия управленческих решений.

Использование ИМТС в качестве платформы сбора экологических данных позволит, кроме контроля воздействия транспорта на экосистемы, контролировать адекватность данных, получаемых от других субъектов техносферной деятельности, актуализировать метеорологические данные, представлять оперативные данные при чрезвычайных ситуациях.

Предложена архитектура ИСЭБ СМП, имеющая трехуровневый вид, ее схема представлена на рисунке 2, подчеркнуто, что именно она может стать основой для создания Комплексной ИСЭБ ИМТС АЗ РФ. Верхний – когнитивный уровень – предназначен для сбора информации различных объектов и органов управления (ведомственных и территориальных) с целью проведения управляющих мероприятий, направленных на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду – на схеме это подсистема управления ИСЭБ. Средний – информационный уровень – для хранения и обработки информации, содержит базы данных, расчетные модели, цифровые двойники, здесь формируются цифровые цепи физических объектов – на схеме это подсистема хранения и обработки экологических данных. Нижний – физический уровень – для сбора разнородной экологической информации, содержит различные стационарные и мобильные датчики, системы и устройства мониторинга окружающей среды – на схеме это подсистема мониторинга и сбора экологических данных.



Рис. 1 – Архитектура интеллектуальной системы экологической безопасности для Северного морского пути

На схеме видно, подсистема мониторинга и сбора экологических данных включает различные стационарные и мобильные датчики, системы и устройства мониторинга окружающей среды МТС. В настоящее время авторами проводится углубленное исследование оценки эффективности применения в составе ИСЭБ ИМТС разработок науки и промышленности, выполняемых в последние годы для арктических широт предприятиями Арктического научно-производственного кластера Санкт-Петербурга.

Отдельного внимания заслуживает вопрос экологической безопасности деятельности пунктов внепортовой обработки грузов, как составляющей транспортной системы СМП. Необходимо включение зон расположения этих пунктов в состав элементов системы экологического мониторинга.

#### Актуальные аспекты вопроса внепортовой обработки груза в Арктике

Работы, посвященные исследованию инфраструктурных аспектов глубокого комплексного освоения арктических территорий, обращаются к вопросам стратегического развития перспективной инфраструктуры Арктики в увязке с процессами пространственного развития РФ. Задача создания условий для освоения решается на базе задач развития транспортно-логистических коридоров с опорой на железнодорожный комплекс и СМП. Рассмотрены приоритеты и факторы влияющие на темпы развития транспортной инфраструктуры, сформулированы долгосрочные цели, задачи, концепция и требования к транспортной инфраструктуре Арктики в составе Макрорегиона (Сибирь, Дальний Восток, Арктика). Состояние и особенности развития инфраструктуры определяются текущим социально-экономическим уровнем развития региона и его климатогеографическими условиями [4].

Политикой государства, направленной на поддержку дальнейшего освоения Арктики,

обусловлена интенсификация перевозок. Повседневная деятельность предприятий и организаций выполняющих работы в Арктике, обеспечение населения социально значимыми грузами, развитие транспортной и сопутствующей инфраструктуры влияют на увеличение интенсивности перевозок. Необходимо учитывать, что Заполярье особый регион, природно-климатические условия которого не располагают к возведению избыточного количества инфраструктурных объектов.

В современных условиях РФ развивает разностороннее присутствие в Арктике. Разносторонность определяется как широкой ведомственной принадлежностью реконструируемых, и вновь создаваемых объектов, так и их масштабом – от вновь строящихся заводов и портов с сопутствующей инфраструктурой до отдельных городков, в том числе военных, и точечных объектов. Во всех случаях любая деятельность начинается с первичной доставки материальных средств на возрождаемый или создаваемый объект. Объемы грузов первичной доставки специалисты делят на три укрупненные группы [5]:

- грузы для размещения, первичного обустройства и жизнеобеспечения личного состава (строителей, военнослужащих и других категорий лиц);
- строительные материалы и оборудование для дальнейшего собственного обустройства;
- строительные материалы и оборудование для возводимого объекта.

Для внепортовой выгрузки небольших партий разнородных генеральных грузов многолетний опыт экспедиционного завоза выработал два основных подхода: выгрузка с использованием рейдовых плавсредств (РПС) различной конструкции (рисунок 2,3); выгрузка с использованием рейдовых воздушных средств, обычно вертолётов (рисунок 4).



Рис. 2 – Буксировка груженого зеэна ПМП



Рис.3 – Разгрузка зеэна ПМП автокраном



Рис.4 – Выгрузка социально-бытового блока вертолётом

В результате проведенного в ряде работ анализа выделяют наличие нескольких технологий внепортовой выгрузки тяжелых генеральных грузов [6,7].

1. Погрузка грузов с судов в кузова автомобилей (иных наземных транспортных средств, включая волокушки), предварительно размещенных в РПС аппарельного типа. Таким образом, достигается возможность самостоятельного съезда груженого автомобиля с РПС, его следование к месту окончательной доставки груза с последующей выгрузкой в стационарных условиях. Затем порожний или груженый обратным грузом автомобиль отвозится РПС обратно к борту судна, где цикл повторяется.

2. Применение в качестве элементов РПС и временных причалов табельных средств инженерных, дорожных войск и морской инженерной

службы ВМФ – ряд технических и технологических решений разработан, запатентован и применен в Вооружённых силах РФ. В частности, элементы системы понтонно-мостового парка (ПМП) позволяют, выступая в роли своеобразного «конструктора», формировать варианты временных плавпричалов сообразно их предназначению (для судов небольшого водоизмещения, для рейдовых плавсредств) и условиям конкретного берега. Аналогично используются элементы наплавного автодорожного разборного моста.

3. Использование комплексной контейнерной транспортно-технологической системы внепортовой обработки судов.

Возможности, предлагаемые имеющимися сегодня средствами внепортовой обработки для контейнеризированного груза, в общем виде представлены на рисунке 5.

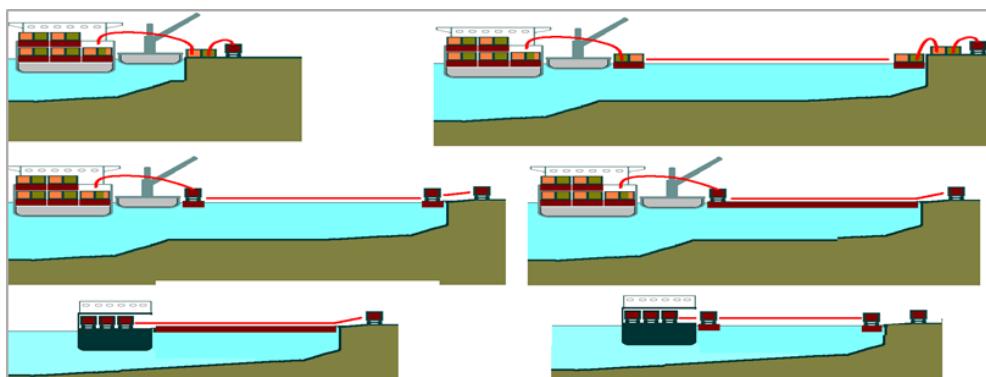


Рис.5 – Общие схемы внепортовой обработки груза

Здесь доставка грузов между морским фронтом и берегом условно показана в самом сокращенном варианте. Средства внепортовой обработки грузов разнородны и включают как традиционные, так и специализированные технические средства, применяются, например, амфибийные средства (рисунок 6).

Сформированы и новые транспортно-технологические системы выгрузки снабженческих грузов во внепортовых условиях с применением: саморазборных понтонов и различных технологий их использования, канатной дороги, трос-блочного устройства. Схемы применения систем представлены соответственно на рисунках 7, 8, 9.

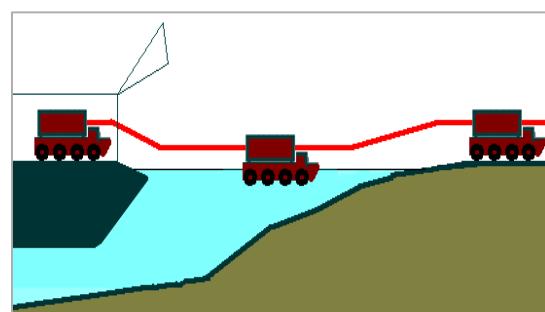


Рис.6 – Использование амфибий для передачи груза между судном и берегом

Единым транспортно-технологическим решением является использование лихтеровоза. Сегодня она применяется на ледокольном атомном судне «Севморпуть». Судно предназначено для

транспортировки грузов в лихтерах и контейнерах в отдалённые северные районы. Имеет масштабное логистическое преимущество для обслуживания всех арктических грузопотоков.



Рис. 7 – Выгрузка с использованием саморазборных плашкоутов



Рис.8 – Выгрузка с использованием канатной дороги

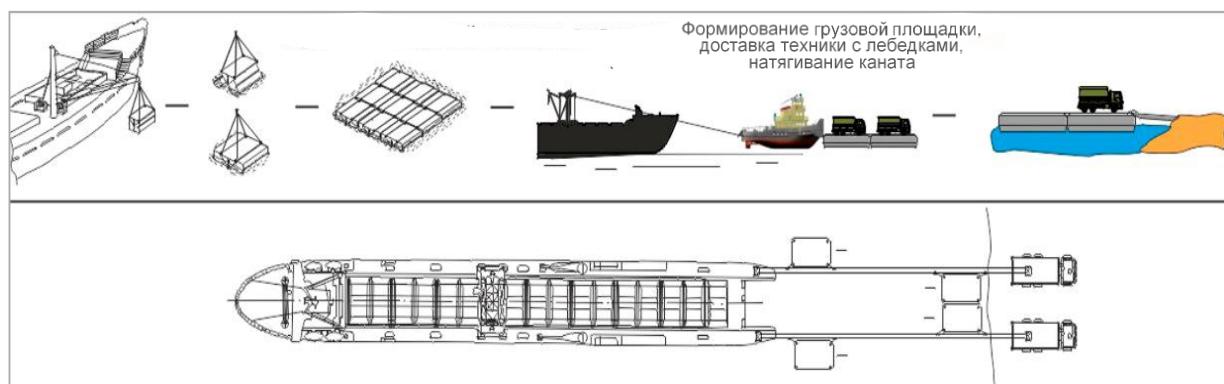


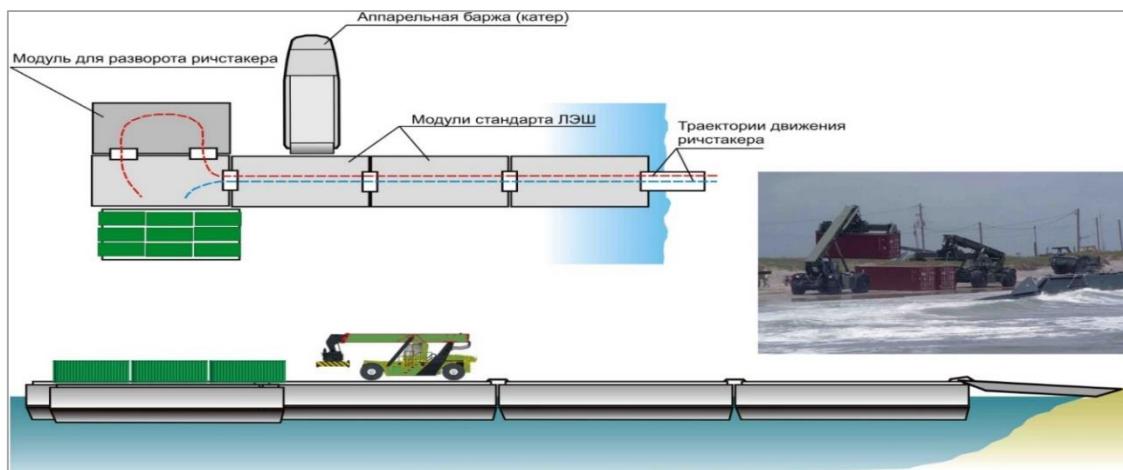
Рис. 9 – Выгрузка с использованием трос-блочного устройства

Транспортно-технологическая лихтеровозная система, состоит из следующих компонентов: ледокольно-транспортное судно (лихтеровоз) с ядерной силовой установкой, оборудованное дополнительными кранами; понтонно-причальные модули (ППМ); аппарельные и трюмные площадки, транспортно-буксирные аппарельные баржи (ТБАП); полевые контейнерные погрузчики (ричстакеры).

Основные элементы, компоновка и пример выгрузки лихтерной транспортно-технологической системы для работы на необорудованном побережье представлен на рисунке 10.

Порядок работы у необорудованного побережья включает ряд технологических операций: выгрузка ричстакеров в ТБАП, выгрузка ППМ, наведение ТБАП плавпричала, выгрузка гружёных специализированных модулей или выгрузка груза на модули, их буксировка к плавпричалу и берегу ТБАП, разгрузка ричстакерами или своим ходом, отвоз ричстакеров ТБАП на ледокольно-транспортное судно, отвоз понтонно-причальных модулей и их обратная погрузка на судно.

Также активно осуществляется операция выгрузки грузов судовым краном на ледовый припай.



*Рис. 10 – Основные элементы и компоновка лихтерной транспортно-технологической системы для работы на необорудованном побережье*

Грузы первичной доставки, независимо от характера объекта, являются генеральными и развитых береговых средств для их выгрузки ещё нет. Таким образом для крупных объектов необходимо формирование опережающей портовой инфраструктуры для последующего приёма крупных партий строительных грузов; для точечных объектов подобная инфраструктура может быть вовсе не предусмотрена. В любом случае в регионе предполагается продолжение деятельности по внепортовой обработке грузов, их выгрузке на необорудованное побережье, достаточно часто – на ледовый припай, на галечные пляжи при мелководье и т. д. Объёмы отдельных партий снабженческих грузов в адрес одного получателя при экспедиционном северном завозе составляют от 3–5 до 500 т.

Выполнение снабженческих перевозок, доставки социально значимых грузов, экспедиционного завоза материальных средств в российской Арктике на необорудованные территории являются неотъемлемой частью морской транспортной системы СМП. При этом сходные в технологическом отношении транспортные операции выполняет множество разнородных, разноведомственных пользователей. Таким образом, в рамках формирования основ рациональной организации подсистемы сбора данных ИСЭБ, пункты внепортовой обработки грузов целесообразно выделять в отдельный, подлежащий периодической корректировке, компонент.

#### **Контроль экологической безопасности деятельности пунктов внепортовой обработки грузов**

Представленные технологические решения, используемые при внепортовой обработке грузов, непосредственно связаны с агрессивным физическим антропогенным воздействием в береговом звене Арктики. Как видно из описаний технологий, выгрузка генеральных и сыпучих грузов выполняется с применением самоходных барж, амфибийных транспортных средств, гусеничных тягачей, саней волокуш, различных погрузчиков, pontонных причалов, передвижных сходен, Гидрометеорологические условия, зачастую

неблагоприятные, в силу особенностей региона, способствуют и повышенной аварийности перегрузочных операций. Возможно, как возникновение аварийных ситуаций, экологических инцидентов, аварийных сбросов груза, несанкционированного сброса отходов, так и катастрофическое повреждение береговой зоны при установке и эксплуатации сходен плавпричалов. Технологические работы по обработке грузов обычно выполняются по регламенту, при этом данные работы не предполагают сопровождение операций надзорными органами государственной власти в сфере экологической безопасности.

Прибрежная зона (ПЗ) арктических морей практически полностью расположена в зоне отрицательных среднегодовых температур, что определяет ход экзогенных процессов (солифлюкции, термокарста, абразии), в межсезонье активно проявляются процессы морозного выветривания коренных пород, денудационные процессы [8]. Приведенные выше схемы демонстрируют различные варианты использования сложных инженерных приспособлений и применения специализированных рейдовых плавсредств как раз в ПЗ арктических морей, что и самостоятельно наносит вред окружающей среде, и усиливает отрицательные воздействия природных явлений.

Мелководные арктические шельфы северных морей имеют важное значение для переноса загрязняющих веществ в Арктике по ряду причин. Там в первую очередь образуется и тает лед, в течении некоторого времени держится открытая вода, что обеспечивает возможность обмена контаминациями между собой и воздухом, они имеют высокую биологическую продуктивность, благодаря чему загрязняющие вещества попадают в пищевые цепи. Имеются две возможности аккумуляции морским льдом загрязняющих веществ – из атмосферы и из воды во время ледостава, донный и внутриводный лед захватывает в себя разрушенный материал береговой зоны и дна. Когда сформировавшийся в береговой части лед становится частью пакового, он переносится при дрейфе. И далее загрязненный лед циркулирует в Северном ледовитом океане от одного года до семи лет [9].

Включение пунктов внепортовой обработки грузов и зон выгрузки грузов на необорудованные территории в состав компонентов подсистемы сбора информации ИСЭБ предполагает выполнение ряда мероприятий.

1. Внесение пунктов в перечень контролируемых объектов СМП и в геоинформационную систему подсистемы обработки информации ИСЭБ.

2. Сбор и внесение в базу данных ИСЭБ исходных биотических, гидрологических, морфологических, метеорологических данных по объектам.

3. Формирование системы контроля стационарных датчиков, состоящих в структуре ИСЭБ, на территории и акватории объектов.

4. Формирование системы контроля мобильных датчиков, состоящих в структуре ИСЭБ, на транспортных средствах и технологических устройствах обработки грузов, в том числе средств фото- видеофиксации, утверждение регламента.

5. Формирование регламента периодичности выездного контроля показателей специалистами ИСЭБ.

6. Введение методов обработки экологических данных, моделирования и прогнозирования развития событий.

7. Формирование перечня управляющих воздействий.

Перечень предлагаемых мероприятий содержит как транслирование, предложенных ранее механизмов контроля экологической обстановки АИМТК, так и дополнительные методы экологического моделирования загрязнений прибрежных акваторий [10, 11].

Блок принятия решений целесообразно расширить программными продуктами математического моделирования загрязнений, зарекомендовавшими себя в ряде работ при проведении моделирования распространения загрязнений на участках водоемов обладающих гидроморфологическими особенностями [12]. Для формирования рельефа поверхности дна используется пакет твердотельного моделирования. Затем моделируется распространение аварийного разлива нефтепродуктов в акватории, выявляется застойная область через временные интервалы после разлива [12].

На основании анализа динамики распространения, авторами сделан вывод, загрязнение не всегда перемещается с течением и покидает загрязненный участок. При наличии гидроморфологических особенностей: турбулентной зоны, затона, застойной области, часть загрязняющего вещества может оставаться в точке выброса [12].

Использование информационных систем, базирующихся на математическом моделировании, позволяет получить более полную картину распространения загрязнения, учесть дополнительные экологические риски и разработать комплекс мероприятий по защите отдельных объектов.

В перспективе детальная проработка вопросов функционирования компонента мониторинга объектов внепортовой обработки грузов в составе ИСЭБ должна обеспечить сбор разнородных данных в зоне влияния объектов, совместную обработку этих данных в целях оценки и прогнозирования экологической ситуации и принятия адекватных мер по ее нормализации.

### **Заключение**

Решение задачи повышения уровня экологической безопасности территорий АЗ РФ связано, в числе других, с вопросом разработки эффективной системы экологического мониторинга. При разработке проекта ИСЭБ ИМТС АЗ РФ для сбора, обработки и распределения информации об экологической ситуации в регионе важным показателем является качество выходной информации, которое определяется точностью, полнотой и достоверностью данных и обеспечивается адекватностью входных данных и методов их обработки.

Функционирование пунктов внепортовой выгрузки грузов на необорудованные территории в российской Арктике является неотъемлемой частью морской транспортной системы СМП. Деятельность эта связана с активными антропогенными воздействиями на чувствительные, с низким уровнем самовосстановления, экосистемы ПЗ северных морей. Существующие и перспективные технологии неминуемо предполагают наличие ряда экологических рисков, которые заслуживают отдельного внимания при формировании состава объектов функциональных подсистем ИСЭБ.

Включение данных экологического мониторинга пунктов внепортовых перегрузок на необорудованных территориях в общую систему экологического мониторинга является актуальной задачей для обеспечения высокой эффективности деятельности ИСЭБ ИМТС АЗ РФ.

В дальнейшем исследования по данной проблематике будут направлены на проработку вопроса структурирования цели – обеспечение экологической безопасности в регионе, формирования ее подцелей, их иерархической соподчиненности, с выходом на привязку к конкретным технологиям и мероприятиям, обеспечивающим полноценное функционирование системы экологического мониторинга.

### **Литература**

1. Малыгин И.Г., Кузнецова Е.Ю. Предложения по разработке интеллектуальной системы управления экологической безопасностью Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. Н 1. С. 121 – 128.
2. Морские транспортно-технологические системы: история, современность перспективы. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. – 162 с.
3. Малыгин И.Г., Гавкалюк Б.В., Кузнецова Е.Ю. Интеллектуальная система экологической безопасности – основа Арктического интеллектуального мультимодального транспортного коридора Российской Федерации // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021: материалы Международной научно-практической конференции. 09-10 ноября 2021 г. – СПб.: ИПТ РАН. Том 1. С. 8-12.

4. Макоско А.А., Цыганов В.В., Малыгин И.Г. и др. Инфраструктура Сибири, Дальнего Востока и Арктики. Состояние и три этапа развития до 2050 года / Под ред. Макоско А.А. – СПб.: ИПТ РАН, 2019. – 468 с.
5. Кириченко А.В., Изотов О.А., Мегалинская А.Ю. Обоснование транспортно-технологических систем для выполнения экспедиционного завоза // Системный анализ и логистика. – 2012. С. 38-44
6. Кириченко А.В., Кузнецов А.Л. Схемы обработки торговых судов с контейнеризированным грузом // Транспорт Российской Федерации. Морской и речной транспорт. – 2014. С. 45-47
7. Давыденко А.А. Технологические решения по выгрузке контейнерных грузов на необорудованное побережье в условиях Арктики // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. № 5 (39). С. 7-19
8. Ионин А.С. Рельеф шельфа Мирового океана. – М.: Наука, 1992. – 255 с.
9. Айбулатов Н.А. Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии / Айбулатов Н.А.; отв. Ред. Осипов В.И.; Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова – М.: Наука, 2005. – 364 с.
10. Решняк В.И. Оценка уровня экологической опасности источников аварийных разливов нефти // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 4 (97). С. 72-76.
11. Липатов И.В., Пластиин А.Е. Оценка гидродинамических условий при ликвидации разливов нефти. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 5 (27). С. 127-134.
12. Домнина О.Л., Липатов И.В. Влияние гидроморфологических особенностей речного русла на характер распределения шлейфа загрязнения нефтью при авариях судов, Морские интеллектуальные технологии. 2022, № 2 часть 1

#### References

1. Malygin I.G., Kuznetsova E.Iu. Predlozhennia po razrabotke intellektualnoi sistemy upravlenii ekologicheskoi bezopasnosti Severnogo morskogo puti [Proposals for the development of an intelligent system for managing the environmental safety of the Northern Sea Route] // Morskie intellektualnye tekhnologii. 2022. T. 1. N 1. S. 121 – 128.
2. Morskie transportno-tehnologicheskie sistemy: istoriia, sovremennost, perspektivy [Maritime transport and technological systems: history, modernity, prospects] – SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2019. – 162 s.
3. Malygin I.G., Gavkaliuk B.V., Kuznetsova E.Iu. Intellektualnaia sistema ekologicheskoi bezopasnosti – osnova Arkhicheskogo intellektualnogo multimodalnogo transportnogo koridora Rossiiskoi Federatsii [Intelligent system of environmental safety - the basis of the Arctic intelligent multimodal transport corridor of the Russian Federation] // Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2021: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 09-10 noiabria 2021 g. – SPb.: IPT RAN. Tom 1. S. 8-12.
4. Makosko A.A., Tsyganov V.V., Malygin I.G. i dr. Infrastruktura Sibiri, Dalnego Vostoka i Arktiki. Sostoianie i tri etapa razvitiia do 2050 goda [Infrastructure of Siberia, the Far East and the Arctic. State and three stages of development until 2050] / Pod red. Makosko A.A. – SPb.: IPT RAN, 2019. – 468 s.
5. Kirichenko A.V., Izotov O.A., Megalinskaia A.Iu. obosnovanie transportno-tehnologicheskikh sistem dlia vypolneniya ekspeditsionnogo zavoza [Substantiation of transport and technological systems for forwarding delivery] // Sistemnyi analiz i logistika. – 2012. S. 38-44
6. Kirichenko A.V., Kuznetsov A.L. Skhemy obrabotki torgovykh sudov s konteinezirovannym gruzom [Handling schemes for merchant ships with containerized cargo] // Transport Rossiiskoi Federatsii. Morskoi i rechnoi transport. – 2014. S. 45-47
7. Davydenko A.A. Tekhnologicheskie resheniiia po vygruzke konteinerynykh gruzov na neoborudovannoe poberezhe v usloviakh Arktiki [Technological solutions for unloading containerized cargo on an unequipped coast in the Arctic] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2016. № 5 (39). S. 7-19
8. Ionin A.S. Relef shelfa Mirovogo okeana. [The relief of the World Ocean shelf] – M.: Nauka, 1992. – 255 s.
9. Aibulatov N.A. Deiatelnost Rossii v pribrezhnoi zone moria i problemy ekologii [Russia's activities in the coastal zone of the sea and environmental problems] / Aibulatov N.A.; otv. Red. Osipov V.I.; In-t okeanologii im. P.P. Shirshova – M.: Nauka, 2005. – 364 s.
10. Reshniak V.I. Otsenka urovnia ekologicheskoi opasnosti istochnikov avariiynykh razlivov nefti [Assessment of the level of environmental hazard of oil spill sources] // Eksploatatsiia morskogo transporta. 2020. № 4 (97). S. 72-76.
11. Lipatov I.V., Plastinin A.E. Otsenka gidrodinamicheskikh usloviy pri likvidatsii razlivov nefti [Assessment of hydrodynamic conditions during oil spill response] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2014. № 5 (27). S. 127-134.
12. Olga L. Domnina, Igor V. Lipatov The Influence of Hydromorphological Features of the River Channel on the Distribution of the Oil Pollution Plume during Ship Accidents, Marine intellectual technologies. 2022 No 2 Part 1

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Елена Юрьевна Кузнецова**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: helhena@mail.ru

**Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, кандидат экономических наук, профессор, директор Института международного транспортного менеджмента, заведующий кафедрой портов и грузовых терминалов ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kirichenkoAV@gumrf.ru

**Мария Юрьевна Михайлова**, младший 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

**Elena Y. Kuznetsova**, Ph.D. (Eng), researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences 13, 12-th Line VO, , St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: helhena@mail.ru

**Aleksandr V. Kirichenko**, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the Ports and Cargo Terminals Department. Federal State Educational Institution of Higher Education "Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping". 5/7, Dvinskaya str, Saint-Petersburg, Russia, 198035; e-mail: kirichenkoAV@gumrf.ru

**Mariya Y. Mikhailova**, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: krab49@mail.ru

**Sergey N. Turusov**, professor, Dr.Sci. (Eng), General Director, JSC all-Russian scientific research design and Technology Institute of electrical engineering (VNIITI EM) 2, Blagodatnaya st., St. Petersburg, 196128, Russian Federation, e-mail: serniktur@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2022.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.05.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

## AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 629.12.001.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.028>

### Динамические характеристики колесного судна при реализации швартовых операций с учетом внешних воздействий

Л.С. Грошева<sup>1</sup> kaf\_radio@vsuwt.ru В.И. Плющаев<sup>1</sup> vip3345@yandex.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация** В работе обсуждаются вопросы, связанные с автоматизацией процесса судовождения в рамках реализации элементов концепции безэкипажного судовождения. Рассмотрена реализация этапов процесса подготовки судна к швартовке в автоматическом режиме судов нового типа, оснащенных колесным движительно-рулевым комплексом. Особое внимание уделено торможению судна, т.е. снижению скорости до приемлемого уровня и выходу его в заранее заданную область. В дальнейшем производится ориентация корпуса судна относительно причальной стенки и перемещение к ней лагом. Маневры выполняются за счет изменения направления вращения и соотношения частот вращения гребных колес. Существенное влияние на динамические характеристики судна при выполнении этого маневра оказывают внешние воздействия. В работе изучено влияние ветра на динамику судна в процессе торможения при реализации предложенного алгоритма управления движительным комплексом судна. Получены аналитические выражения для вычисления поправочного коэффициента для алгоритма управления, обеспечивающего остановку судна в заданной точке в зависимости от силы и направления кажущегося ветра, а также начальной скорости движения судна. Предложенные подходы позволяют реализовать автоматическую швартовку колесных судов.

**Ключевые слова:** Колесные суда, динамические характеристики судна, автоматизация технологических процессов судна, швартовка судна.

**Для цитирования:** Грошева Л.С., Плющаев В.И. Динамические характеристики колесного судна при реализации швартовых операций с учетом внешних воздействий, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 210—217.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.028>

### Dynamic characteristics of a wheeled vessel during mooring operations with regard to external influences

Lyudmila S. Grosheva<sup>1</sup> kaf\_radio@vsuwt.ru, Valery I. Plyushchaev<sup>1</sup> vip3345@yandex.ru

<sup>1</sup>Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Abstract** The paper represents the issues related to automation of the navigation process within the framework of implementing the elements of the unmanned navigation concept. The authors consider the preparation stages of new-type vessels equipped with wheeled propulsion/steering system for mooring in automatic mode. Particular attention is paid to vessel braking, i.e. reducing the speed to an acceptable level and going into a predetermined area. Then the vessel's hull is oriented relative to the quay wall and moves towards it with a lag. The maneuvers are performed by changing the direction of rotation and the ratio of rotation frequencies of the paddle wheels. External influences exert a significant impact on the dynamic characteristics of the vessel when performing this maneuver. The paper studies the effect of wind on the dynamics of a ship during braking while implementing the proposed control algorithm for the propulsion system of the ship. Analytical expressions for calculating the correction factor for the control algorithm are obtained. The algorithm ensures the stopping of the ship at a given point, depending on the strength and direction of the apparent wind, as well as the initial speed of the ship. The proposed approaches make it possible to implement automatic mooring of wheeled vessels.

**Key words:** wheeled vessels, dynamic characteristics of the vessel, automation of technological processes of the vessel, mooring the vessel.

**For citation:** Lyudmila S. Grosheva, Valery I. Plyushchaev, Dynamic characteristics of a wheeled vessel during mooring operations with regard to external influences, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 210—217.

#### Введение

В современной литературе большое внимание уделяется задачам, связанным с реализацией концепции безэкипажного судовождения

[например, 1]. Важной составляющей этой проблемы является разработка алгоритмического обеспечения различных технологических операций на судне (движение по маршруту, расхождение судов,

обеспечение функционирования отдельных судовых систем и комплексов и т.п.).

В данной работе рассматривается реализация швартовки судна в автоматическом режиме. Это одна из наиболее сложных технологических операций. Для безэкипажного судна возможны два варианта процесса швартовки – дистанционное управление движительно-рулевым комплексом судна или швартовка в автоматическом режиме. Естественно, алгоритм управления будет жестко привязан к структуре и параметрам движительно-рулевого комплекса судна и его динамическим характеристикам. Сейчас в России появились и строятся колесные суда. Использование для привода колес асинхронных двигателей и частотных преобразователей позволило уйти от большинства проблем колесных судов старой постройки (колеса не имеют жесткой связи с силовым агрегатом, появилась возможность независимой и плавной регулировки частоты вращения, существенно снизился расход топлива и пр.). Опыт эксплуатации колесных судов «Сура», «Колесовъ» и «Доброходъ» доказали их высокую энергоэффективность [2,3]. У них нет руля, приводится в движение и управляет судно двумя гребными колесами. На строящемся судне «Золотое кольцо» (длина более 80 м) дополнительно к двум гребным колесам установлено носовое азимутальное подруливающее устройство. На этом судне планируется отработка алгоритмов автоматической швартовки.

Цель данной работы – разработка алгоритмического обеспечения для реализации автоматической швартовки колесного судна, а также исследование динамики судна при реализации предлагаемых алгоритмов при воздействии внешних помех.

### 1. Материалы и методы. Состояние вопроса.

На рис. 1 приведена расчетная схема (1 – причал, 2 – судно). Заданы координаты точки причаливания А ( $x_0, y_0$ ). Центр масс пришвартованного судна G должен находиться на расстоянии  $h/2$  от точки причаливания, где  $h$  – ширина судна. На расстоянии  $L_{ш} = (1 \div 2)b$ , где  $b$  – длина судна, определена зона с координатами центра А' ( $x_1, y_1$ ) и радиусом  $r$ , в которой скорость судна должна быть снижена до заданной величины и осуществлена ориентация его корпуса параллельно причальной стенке для дальнейшего перемещения лагом к причальной стенке.

Процесс автоматической швартовки можно разбить на несколько этапов.

Этап 1. Движение судна к точке А' ( $x_1, y_1$ ). Система управления обеспечивает перемещение судна, используя координаты полученные от спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС, NAVSTAR, ГАЛИЛЕО, КОМПАС). Любую траекторию можно аппроксимировать набором прямолинейных отрезков. Поэтому при моделировании конечный сегмент траектории представляет собой отрезок прямой. Результаты исследования динамики судна при следовании по заданной траектории изложены в [4].

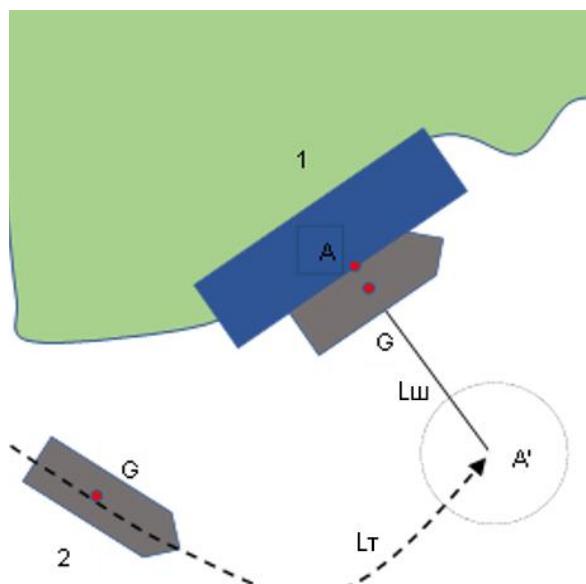
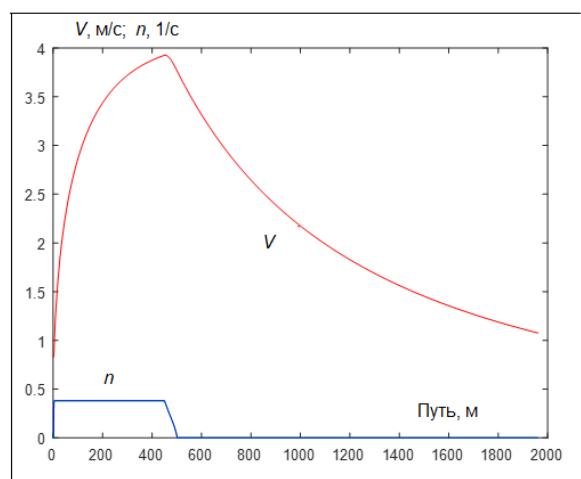


Рис. 1. Процесс швартовки судна

Этап 2. Торможение судна. В работе [5] показано, что эффективное управление судном «Золотое кольцо» с использованием комплекса гребные колеса – подруливающее устройство (в том числе движение лагом в любом направлении) возможно лишь при скоростях судна менее 1,4 м/с (менее 5 км/ч). Т.е. при подходе к точке А' ( $x_1, y_1$ ) судно должно снизить скорость до приемлемого значения. На рис. 2 показано изменение скорости движения судна  $V$  в зависимости от времени и пройденного расстояния  $X$  при естественном торможении (обороты гребных колес судна снижаются от  $n = 0.38$  1/c до 0, при этом колеса переходят в режим свободного вращения под действием набегающего потока). Снижение скорости до 5 км/ч происходит примерно за 670 с, при этом судно проходит около 1570 м.



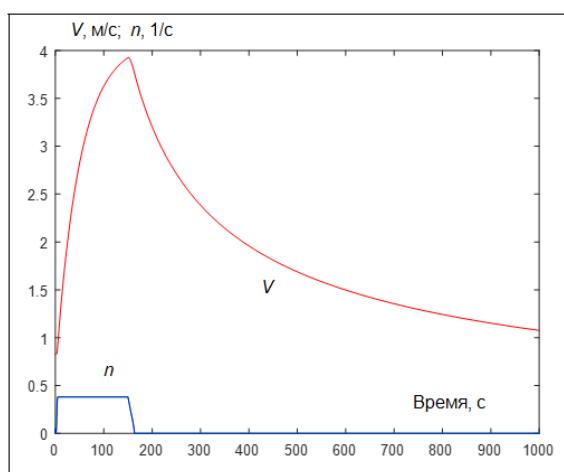


Рис. 2. Процесс естественного торможения судна со скорости 14 км/ч

Для практики полученные результаты неприемлемы, т.е. при подходе к точке назначения А' ( $x_1, y_1$ ) на расстояние  $(1 \div 3) b$  требуется интенсивное торможение до приемлемой скорости, что можно достигнуть при обратном вращении колес.

Динамика судна при активном торможении представлена на рис. 3. При исследованиях использовалась математическая модель колесного судна, представленная в [6,7].

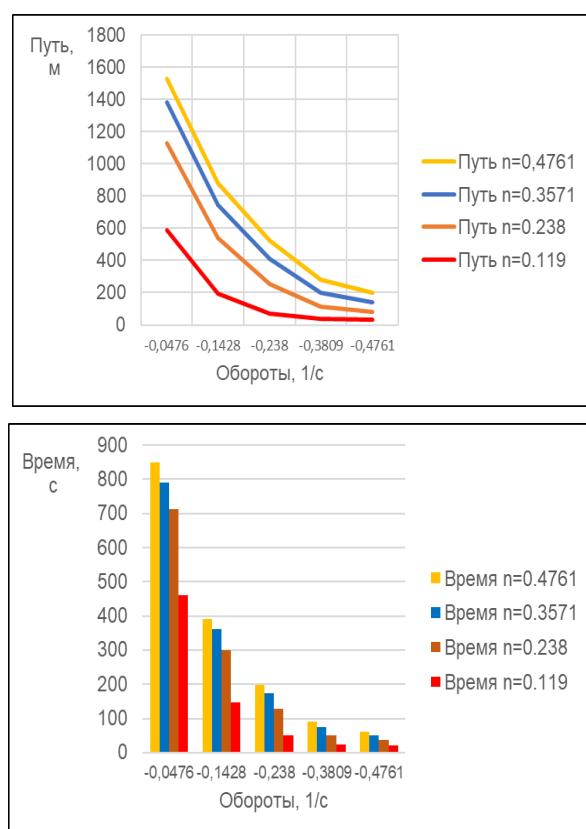


Рис. 3. Тормозной путь и время торможения как функции скорости судна и обратной частоты вращения гребных колес

На рис. 3 по горизонтальной оси показана частота вращения колес при торможении. Для исключения перегрузок дизель – генераторов при реверсе принят

следующий алгоритм управления гребными колесами при торможении. На первом этапе производится сброс оборотов с фактического значения до 0 по заложенный в частотный привод S-характеристике с постоянной времени в 7 с, на втором этапе в течение 10 с управление не выдается, на третьем этапе включается обратное вращение колес (набор оборотов происходит также по S-характеристике с постоянной времени в 7 с).

Как следует из результатов расчетов, при любой начальной скорости движения судна на расстоянии  $(1 \div 3) b$  до прихода в точку скорость может быть снижена до приемлемого уровня и за приемлемое время, обеспечивающее переход судна к заключительному этапу швартовки.

Этап 3. Подготовка к швартовке. Автоматическая система управления обеспечивает удержание судна вблизи точки А' ( $x_1, y_1$ ), в том числе при внешних воздействиях, осуществляя ориентацию и стабилизацию положения корпуса параллельно причалу. В этой зоне начинает работать лазерная дальномерная система [8], обеспечивающая измерение расстояний от носа и кормы судна до причала. Данные лазерного дальномера являются основными на этапе швартовки. Если предполагается дистанционное управление процессом швартовки, то выполняется полная остановка судна вблизи точки А' ( $x_1, y_1$ ).

Этап 4. Перемещение судна лагом к точке швартовки А ( $x_0, y_0$ ) со стабилизацией положения корпуса параллельно причалу. Алгоритм швартовки и динамические характеристики судна при выполнении швартовых операций описаны в [5].

## 2. Алгоритм торможения колесного судна

Остановимся подробнее на втором этапе – процессе торможения судна. Зависимости, приведенные на рис. 3, позволяют «предсказать» при текущей скорости движения судна на расстоянии  $L_t$  необходимую частоту вращения колес (в обратном направлении) для остановки в районе точки А'. Таким образом, зная расстояние  $L_t$  до точки А' (что определяется навигационным спутниковым приемником) можно вычислить необходимую частоту вращения колес  $n_{top}$  для остановки судна, используя следующее выражение (аппроксимация кривых на рис. 3) при начальных оборотах  $n_{ нач }$ :

$$n_{top} = - (-0,0936 * n_{ нач } - 0,1135) * \ln(L_t) + (0,8803 * n_{ нач } + 0,6888) \quad (1)$$

Эти зависимости представлены на рис. 4. Здесь пунктирной линией отмечено максимальное значение частоты вращения гребных колес. Таким образом, остановить судно, движущееся с максимальной скоростью, можно на участке длиной в 200 м (что соответствует  $2,5 b$ ). При снижении начальной скорости длина тормозного пути существенно уменьшается.

На рис. 5 проиллюстрирован процесс торможения судна с полного хода ( $V = 4,87$  м/с или 17,5 км/ч). Начало торможения – за 240 м до заданной точки А' (начало операции на 150 секунде).

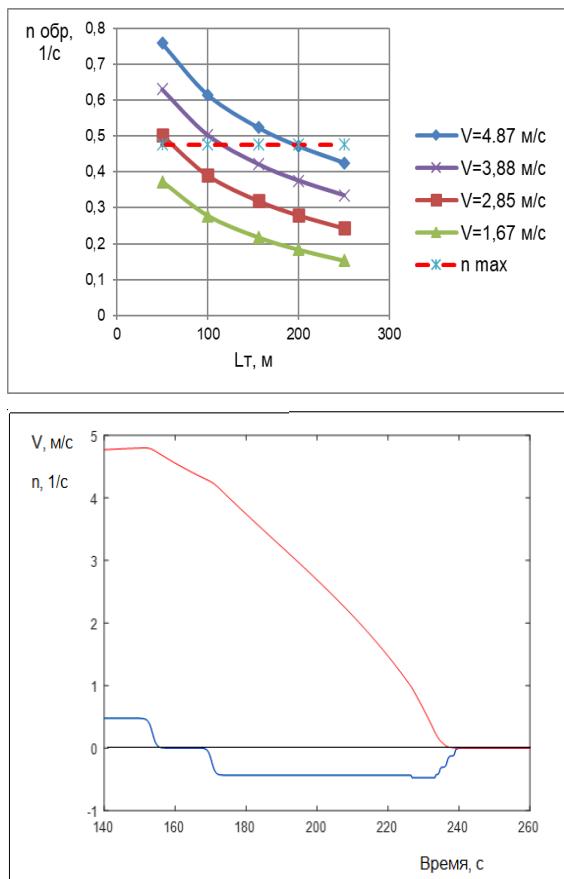


Рис. 4. Тормозной путь судна при различных начальных скоростях

Обороты сбрасываются до 0 и через заданный интервал (для исключения механических перегрузок приводов гребных колес) устанавливается необходимое значение числа оборотов гребных колес в соответствии с зависимостями, представленными на рис. 4, которые обеспечивают снижение скорости судна до 1 м/с. При достижении этой скорости включается алгоритм гашения скорости до 0. Управление  $U_x$  ( $-1 \leq U_x \leq 1$ ) на приводы можно представить как:

$$U_x = \begin{cases} -k_x * \frac{V}{V_{max}}, & sign(x_{ост} - x) \neq sign V; \\ 0, & при sign(x_{ост} - x) = sign V, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_{ост}$  – координата точки остановки.

Зависимости скорости судна и частоты вращения гребных колес от пройденного расстояния и времени представлены на рис.5. Общий тормозной путь составляет 250 м, время – 90 с, что приемлемо в реальных условиях

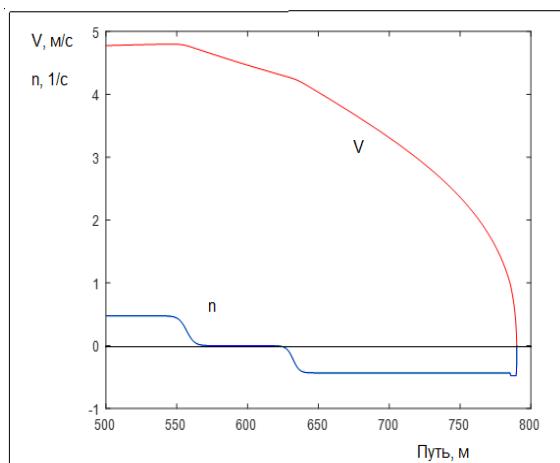


Рис. 5. Процесс торможения судна с полного хода

Динамика судна сильно зависит от ветра. Направление и сила ветра оказывается как на скорости движения судна к заданной точке, так и на сносе судна с траектории и ориентации его корпуса в пространстве. Рассмотрим простейший случай – ветер дует строго в корму или в нос судна. В зависимости от силы ветра кривые на рис. 4 смещаются вверх (ветер в корму) или вниз (ветер в нос судна). Это эквивалентно умножению  $n_{top}$  в уравнении (1) на некоторый коэффициент  $k_e$ , зависящий от скорости и направления ветра, а также парусности судна.

Таким образом, выбором коэффициента  $k_e$  можно компенсировать действие силы ветра.

При реализации алгоритма гашения скорости при воздействии ветра в точке остановки гребные колеса не могут быть полностью остановлены, они должны обеспечивать компенсацию смещение судна вдоль траектории под воздействием ветра. Для этого алгоритм (2) модифицирован:

$$Ux = \begin{cases} -k_x * \frac{V}{V_{max}}, & sign(x_{ост} - x) \neq sign V; \\ -k'_x * \frac{V}{V_{max}}, & sign(x_{ост} - x) = sign V; \end{cases} \quad (3)$$

$$k'_x = 0,1 * k_x$$

На рис. 6 показаны результаты моделирования режима работы гребных колес в процессе торможения судна при скорости ветра  $V_e = 10$  м/с.

При реализации алгоритма гашения скорости (3) при ветре в корму ( $k_e = 1 + 0,01 V_e$ ) в точке остановки гребные колеса врачаются в обратном направлении с  $n_{обр} = 0,115$  1/c, обеспечивая удержание судна в заданной точке (кривая б на рис.6).

Для удержание судна в заданной точке при ветре в нос ( $k_e = 1 - 0,019 V_e$ ) колеса врачаются в прямом направлении с  $n = 0,106$  1/c (кривая а на рис.6).

В результате моделирования процесса торможения с использованием математической модели [6,7], были получены зависимости коэффициента  $k_e$ , обеспечивающего остановку судна в заданной точке, от силы и направления каждого ветра  $V_{e_k}$  (нос, крма), а также управления  $U_x$ . Результаты показаны на рис. 7.

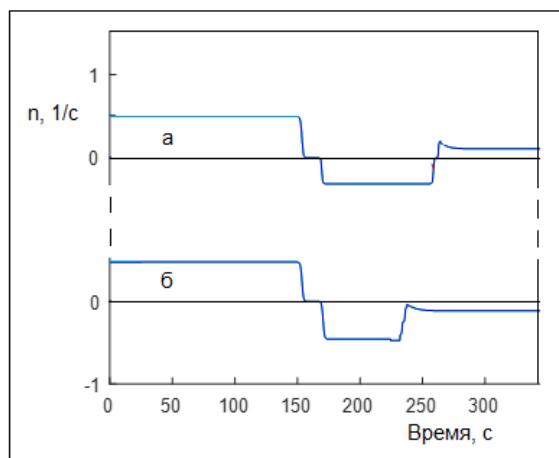


Рис. 6. Режимы работы гребных колес при ветре (а – ветер в нос, б – ветер в корму)

Апроксимировать зависимости (рис. 7) и привести их к единому выражению во всей области определения параметров с достаточной точностью не удается, поскольку динамика судна заметно зависит от направления вращения гребных колес. КПД гребных колес при вращении в обратном направлении падает почти на 10%.

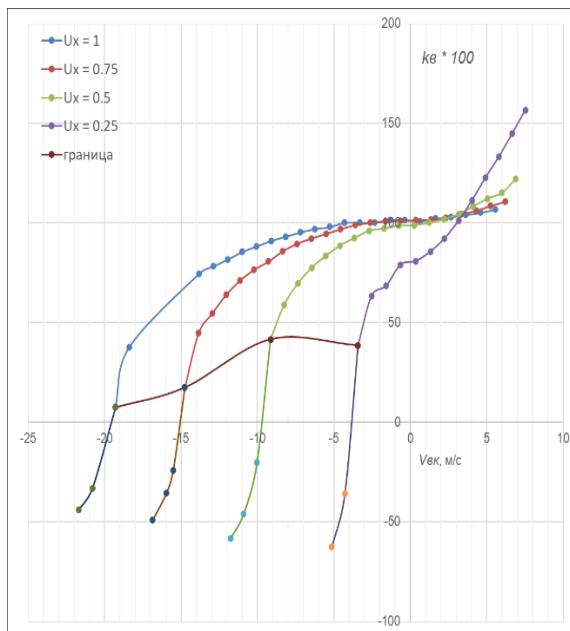


Рис. 7. Зависимости коэффициента  $k_B$  от силы и направления кажущегося ветра  $V_{BK}$  (нос, крма), а также управляющего воздействия  $U_x$

Если ветер направлен в корму судна при торможении колеса вращаются всегда в обратную сторону. При ветре в нос судна при его малых значениях колеса также вращаются в обратную сторону. Однако при некотором значении  $V_{BK}$  (эта величина зависит от начальной скорости судна и дистанции торможения) для достижения точки останова  $x_{stop}$  гребные колеса должны вращаться вперед (проиллюстрировано кривой а на рис. 6). Поэтому на рис. 7 можно выделить две зоны, отличающиеся направлением вращения гребных колес (граница изображена на рис. 7).

Зависимость  $V_{BK}$  от управляющего воздействия  $U_x$  (или скорости судна в момент начала торможения показана на рис. 8.). Эта линия делит область параметров на две части. Верху – колеса вращаются в обратном направлении при торможении, ниже – в прямом при ветре в нос.

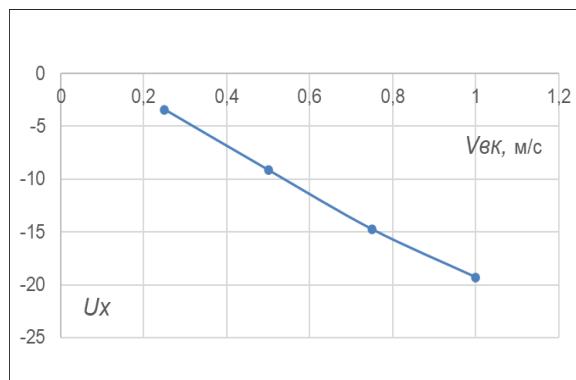


Рис. 8. Области с разным направлением вращения гребных колес

Кривые на рис. 7 (область выше границы) достаточно точно описываются полиномиальной зависимостью 4 степени

$$(4) \quad k_B = A(U_x)V_{BK}^4 + B(U_x)V_{BK}^3 + C(U_x)V_{BK}^2 + D(U_x)V_{BK}^1 + E(U_x),$$

а именно:

$$k_B = 0,000004V_{BK}^4 + 0,0002V_{BK}^3 + 0,0002V_{BK}^2 + 0,0032V_{BK}^1 + 1,0141 \quad \text{для } U_x = 1;$$

$$(5) \quad k_B = 0,000002V_{BK}^4 + 0,0002V_{BK}^3 + 0,0001V_{BK}^2 + 0,0061V_{BK}^1 + 1,0129 \quad \text{для } U_x = 0,75;$$

$$k_B = 0,00004V_{BK}^4 + 0,0007V_{BK}^3 + 0,0017V_{BK}^2 + 0,0056V_{BK}^1 + 0,9863 \quad \text{для } U_x = 0,5$$

$$k_B = -0,0004V_{BK}^4 + 0,0055V_{BK}^3 - 0,0094V_{BK}^2 + 0,0439V_{BK}^1 + 0,8233 \quad \text{для } U_x = 0,25.$$

Зависимости коэффициентов полиномиальных зависимостей (5) от  $U_x$  показаны на рис. 9.

Их можно аппроксимировать полиномами 3 степени (соответствующие формулы представлены на рис. 9).

Подставляя значения коэффициентов А, В, С, Д и Е в (1), можно вычислить коэффициент  $k_B$ , обеспечивающий торможение судна до скорости 1м/с в заданной точке, в зависимости от скорости и направления кажущегося ветра  $V_{BK}$  (нос, крма), а также управляющего воздействия  $U_x$  на приводы гребных колес в начальной точке пути торможения (вращение гребных колес при торможении в обратном направлении).

По аналогии получено выражение для вычисления коэффициента  $k_B$  для области параметров, расположенной ниже границы на рис. 7 (гребные колеса при торможении вращаются в прямом направлении):

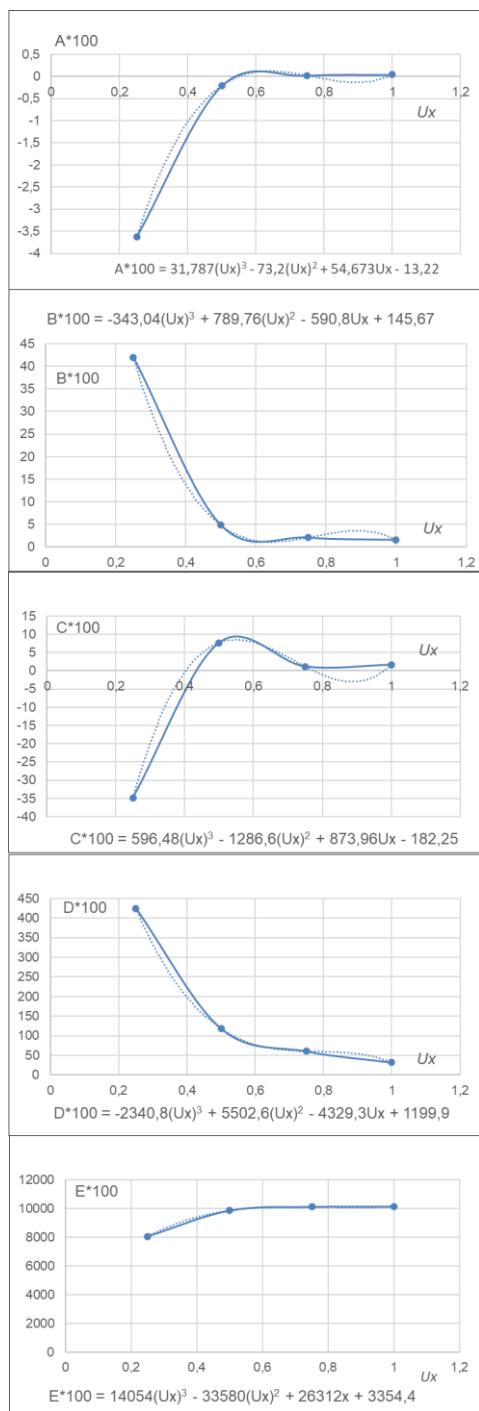


Рис. 9. Аппроксимация коэффициентов уравнения (4)

$$(6) \quad k_B = C_1(U_x)V_{BK}^2 + D_1(U_x)V_{BK}^2 + E_1(U_x),$$

где  $C_1 = (-249.91U_x^3 + 489.25U_x^2 - 321.55U_x + 85.313)/100$ ;

$$D_1 = (-5097.3U_x^3 + 8431.8U_x^2 - 3927.1U_x + 864.27)/100;$$

$$E_1 = (-45715U_x^3 + 75383U_x^2 - 31320U_x + 4629.5)/100;$$

Использование (4) и (6) позволяет прогнозировать процесс торможения судна.

### 3. Алгоритм ориентации корпуса колесного судна

К специфическим особенностям судна, наряду с уникальным движительно-рулевым комплексом, относятся очень малая осадка (до 1.5 м), плоское дно и большая парусность. Это приводит к существенной зависимости динамики судна от величины и направления ветра. Соответствующие зависимости, рассчитанные для трех значений скорости ветра ( $V_e = 1, 3$  и  $5$  м/с), представлены на рис. 10 [7]. Следует отметить заметное влияние на величину крутящего момента смещение относительно друг друга центра масс судна и центра парусности.

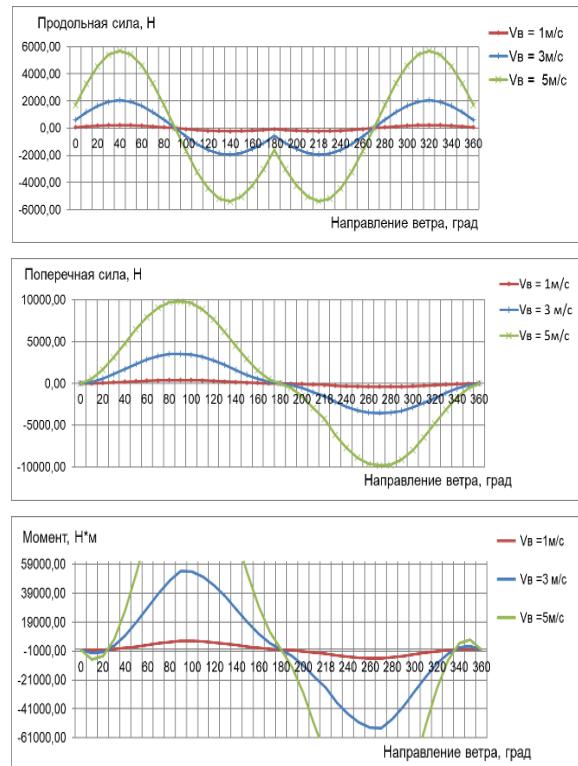


Рис. 10. Силы и крутящий момент, действующие на судно, вызванные ветровым воздействием

В [4] приведен один из алгоритмов, обеспечивающий движение судна по прямолинейному участку с постоянной скоростью при воздействии ветра. Отклонения судна от траектории не превышают 1 м, что приемлемо для практического применения. На рис. 11 показаны динамические характеристики судна при перемещении судна с постоянной скоростью при ветровом воздействии. В момент  $t = 150$  с появляется ветер  $V_e = 10$  м/с с направлением  $45^\circ$ . Судно смещается примерно на 0,5 м, при этом продолжает двигаться по прямолинейной траектории с углом дрейфа  $\beta \approx -0,35^\circ$ , скорость судна практически не меняется. В момент  $t = 300$  с направление ветра меняется с  $45^\circ$  на  $135^\circ$  ( $V_e = 10$  м/с). Судно продолжает двигаться по прямолинейной траектории со смещением примерно в 1.2 м относительно первоначальной траектории с углом дрейфа  $\beta \approx -0,45^\circ$ .

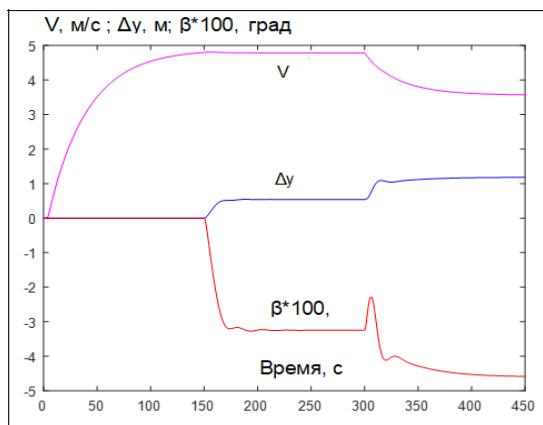


Рис. 11. Моделирование движения судна при изменении параметров ветрового воздействия

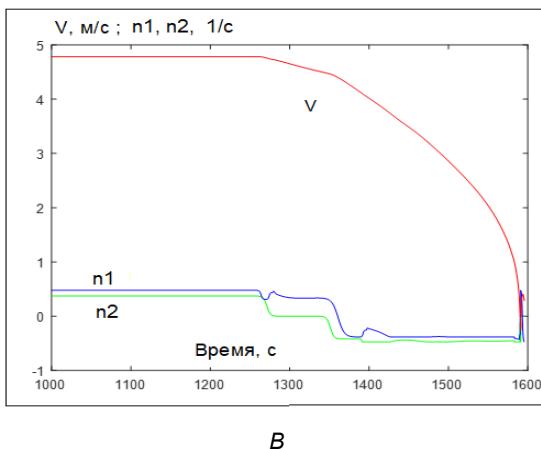


Рис. 12. Динамика судна при торможении и воздействии ветра

Картина резко усложняется при движении судна с переменной скоростью (рис.12). В этом случае непрерывно меняется направление и величина кажущегося ветра, которые являются производными скорости и направления движения судна, а также скорости и направления ветра.

Как следует из рис. 10, крутящий момент весьма сильно зависит как от скорости кажущегося ветра, так и от его направления. Т.е. для удержания корпуса судна в заданном положении необходимо непрерывно изменять соотношение числа оборотов  $n_1$  и  $n_2$  гребных колес. Для компенсации ветра ( $V_e = 10$  м/с с направлением  $45^\circ$ ) поддерживается постоянная разность частот вращения ( $n_1 - n_2$ ), при которой происходит движение судна по прямой с незначительным углом дрейфа. При начале торможения обороты  $n_2$  одного из колес сбрасываются в 0, затем через заданную паузу включается обратное вращение с частотой, выбираемой по алгоритму, описанному в разделе 2. Алгоритм формирует управление для формирования разности частот вращения ( $n_1 - n_2$ ), обеспечивающей в каждый момент времени неизменное положение корпуса судна.

### Заключение

Суда с колесным движительно-рулевым комплексом характеризуются сложной динамикой, требующей высокой квалификации судоводителя. Высокое качество управления достижимо лишь при комплексной автоматизации судовых технологических процессов.

Предложенный вариант фрагментации технологического процесса швартовки судна и рассмотренные алгоритмы позволяют автоматизировать данный процесс для колесных судов, что открывает возможности для реализации концепции безэкипажного судовождения для судов этого типа.

### Литература

- Каретников В.В., Пашченко И.В., Соколов А.И. Перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях Российской Федерации. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — т.9. № 3. — С. 619–627.
- Пат. № 2225327 Российской Федерации, МПК B63H1/04, B63H05/03. Колесный движительно-рулевой комплекс/ Фальмонов Е.В.; заявитель и патентообладатель Фальмонов Евгений Васильевич. № 2001132474/11; заявл. 30.11.2001; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 7., 11 с.
- Галкин Д.А., Малый Ю.А. От «Суры» к «Золотому кольцу». Речной транспорт (XXI век)). 2015. –№2(73). –с. 32–33
- Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В. И. Динамика судна с колесным движительно-рулевым комплексом в условиях внешних воздействий. Морские интеллектуальные технологии. 2019. -№ 4 Т.2. - С.139-146.
- Грошева Л.С., Мерзляков В.И., Плющаев В.И. Швартовка судна с колесным движительно-рулевым комплексом. Морские интеллектуальные технологии. 2019. -№ 3(45). Т.2. - С.191-194.
- Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В. И. Математическая модель судна с колесным движительно-рулевым комплексом «Золотое кольцо». Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2018. – № 3. – С. 36–49.
- Бычков В.Я. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Расчет сил ветрового воздействия на корпус судна с колесно-движительно-рулевым комплексом. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2018. Выпуск 55. С. 11-20.
- Базылев А.В., Бычков В.Я., Перевезенцев, С.В., Плющаев В.И. Аппаратно-программный комплекс для автоматической швартовки судов. Научные проблемы водного транспорта, 2020, №64. - с.195-206.

### References

- Karetnikov V.V., Pashchenko I.V., Sokolov A.I. Perspektivy vnedrenija bezjekipazhnogo sudohodstva na vnutrennih vodnyh putjah rossijskoj federacii [Prospects for the introduction of unmanned navigation on the inland waterways of the Russian Federation]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. — 2017. — t.9. № 3. — S. 619–627.

2. Pat. № 2225327 Rossijskaja Federacija, MPK V63N1/04, V63N05/03. Kolesnyj dvizhitel'no-rulevoj kompleks [Wheel propulsion and steering complex]/ Fal'monov E.V.; zjavitel' i patentooobladatel' Fal'monov Evgenij Vasil'evich. № 2001132474/11; zjavl. 30.11.2001; opubl. 10.03.2004, Bjul. № 7., 11 s.
3. Galkin D.A., Malyj Ju.A. Ot «Sury» k «Zolotomu kol'cu» [From "Sura" to "Golden Ring"]. Rechnoj transport (HHI vek)). 2015. -No2(73). -s. 32–33.
4. Bychkov V.Ja., Grosheva L.S., Pljushhaev V. I. Dinamika sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom v uslovijah vnesnih vozdejstvij [Dynamics of a ship with a wheeled propulsion and steering system under external influences]. Morskie intellektual'nye tehnologii. 2019. -№ 4 T.2. - S.139-146.
5. Grosheva L.S., Merzlyakov V.I., Plyushchaev V.I. Shvartovka sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom [Mooring of a vessel with a wheeled propulsion and steering system]. Morskie intellektual'nye tehnologii. 2019. - № 3(45). T.2. - S.191-194.
6. Bychkov V.Ja., Grosheva L.S., Pljushhaev V. I. Matematicheskaja model' sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom «Zolotoe kol'co» [Mathematical model of a ship with a wheeled propulsion and steering complex "Golden Ring"]. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija: Morskaja tekhnika i tehnologija. – 2018. – № 3. – S. 36–49.
7. Bychkov V.Ja. Grosheva L.S., Pljushhaev V.I. Raschet sil vetrovogo vozdejstvija na korpus sudna s kolesno-dvizhitel'nym rulevym kompleksom [Calculation of the forces of wind action on the hull of a ship with a wheel-propulsion steering system.]. Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2018. Vypusk 55. S. 11-20.
8. Bazylev A.V., Bychkov V.Ja., Perevezencev, S.V., Pljushchaev V.I. Apparatno-programmnyj kompleks dlja avtomaticheskoy shvartovki sudov [Hardware-software complex for automatic mooring of ships]. Nauchnye problemy vodnogo transporta, 2020, №64. - s.195-206.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Людмила Сергеевна Грошева**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Волжского государственного университета водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а, e-mail: kaf\_radio@vsuwt.ru

**Lyudmila S. Grosheva**, Ph.D.(Eng), Associate Professor, associate Professor of the Department of Radio Electronics Volga state University of water transport 603005, Nizhny Novgorod, Nesterov str., 5 e-mail: kaf\_radio@vsuwt.ru

**Валерий Иванович Плющев**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники Волжского государственного университета водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а, e-mail: vip3345@yandex.ru

**Valery I. Plyushchaev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, head of the Department of Radio Electronics Volga state University of water transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterov str., 5a e-mail: e-mail: vip3345@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.11.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.02.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.02.2022.

**Научная статья**

УДК 656.62: 504.4.054

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.029>

## **Оценка риска экологических и эксплуатационных последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами (на примере Волжского бассейна)**

О.Л. Домнина<sup>1</sup> o-domnina@yandex.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация.** Качество работы транспортной системы страны зависит среди прочего от эффективной системы оценки рисков транспортных происшествий и налаженной системы безопасности транспортного комплекса. Целью данного исследования является апробация комплексной математической модели оценки риска транспортных происшествий на водных объектах, учитывающей как чисто экологические последствия транспортных происшествий с судами, так и влияние этих происшествий на эксплуатационные и экономические показатели работы флота. Объектом анализа стали транспортные происшествия с сухогрузными судами. Комплексный риск транспортных происшествий прогнозируется путем произведения вероятностей столкновения с соответствующими последствиями. Среди источников убытков неэкологического характера автором были рассмотрены: потерянный фрахт в результате простоя судна; эксплуатационные расходы на ремонт; убытки от повреждения имущества на борту судна и убытки, причиненные гибелью или повреждением здоровья людей. Для учета этих факторов созданная ранее база данных была дополнена данными по простою судов, сроками проведения расследований, видами повреждений в результате транспортных происшествий. В результате выполненных исследований была создана классификация участков концентрации транспортных происшествий по уровню возможного риска с учетом факторов экологического и неэкологического характера.

**Ключевые слова:** транспортные происшествия, сухогрузные суда, риск вреда, водный транспорт, безопасность

**Благодарности:** автор выражает благодарность Пластинину Андрею Евгеньевичу за представление отдельных данных по транспортным происшествиям.

**Для цитирования:** Домнина О.Л. Оценка риска экологических последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами на примере Волжского бассейна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 218—225.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.029>

## **Assessment of the risk of environmental and operational consequences from transport accidents with dry cargo ships (on the example of the Volga basin)**

Olga L. Domnina<sup>1</sup> o-domnina@yandex.ru

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Russian Federation

**Abstract.** The quality of the country's transport system depends, among other things, on an effective system for assessing the risks of such traffic accidents and an established security system for the transport complex. The purpose of this study is to test a comprehensive mathematical model for assessing the risk of transport accidents at river facilities, taking into account both the purely environmental consequences of transport accidents in an incident with ships, and the impact of transport accidents on the operational and economic performance of the fleet. The object of the analysis was transport accidents with dry cargo vessels. The complex accident risk is predicted by multiplying the collision probabilities with the corresponding consequences. Among the sources of losses of non-ecological nature, the author considered: lost freight as a result of the idle time of the vessel; maintenance costs; losses from damage to property on board the ship and losses caused by death or damage to human health. To take into account these factors, the previously created database was supplemented with data on the downtime of ships, the timing of TP investigations, types of damage as a result of transport accidents. As a result of the studies performed, a classification of areas with a concentration of traffic accidents was created according to the level of possible risk, taking into account environmental and non-environmental factors.

**Keywords:** transport accidents, dry cargo ships, risk of harm, bulk cargo, water transport, safety

**Acknowledgments:** The author is grateful to Andrey Evgenievich Plastinin for presenting some data on traffic accidents

**Financial Support:** the study was carried out at the expense of the Volga State University of Water Transport

**For citation:** Olga L. Domnina, Risk Assessment of Environmental Consequences from Transport Accidents with Dry Cargo Vessels on the Example of the Volga Basin, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 218—225.

### **Введение**

Для системы реагирования в случаях транспортных происшествий (ТП) на водном

транспорте необходимым условием является оценка риска.

Исследованиям в области определения экологических рисков с судами на внутреннем

водном транспорте посвящены работы зарубежных и отечественных авторов [1,2,3,4,5,6,7,8]. В одних из них авторы сосредоточились на определении участков концентрации происшествий [1,7,8], в других главный упор делается на оценке риска через определение вероятности аварий, увязывая их с плотностью движения судов и числом их столкновений [2,3,4,5,6].

Ряд исследований связан с изучением факторов, приводящих к экологическим рискам. Так, в работе [9] говорится о факторах риска экологического загрязнения, сопряженного со столкновениями судов, в работе [10] анализируются экологические потери при эксплуатации танкеров на морской акватории. Но акцент сделан только на разливы нефти из танкеров. При этом в работе было выявлено влияние на риск размеров судов, типа грузов, типа судна и сезонность плавания. В исследовании [11], основываясь на анализе аварий в водах Китая, среди уже перечисленных указывалось также на влияние типа и возраста судна на вероятность аварии. В работе [12] говорится о влиянии на вероятность аварии таких факторов, как поведение судна (продолжительность работы, количество заходов в порт и т. д.), технических и организационных условий работы судна (категории судов, государство флага, возраст, валовой тоннаж и т. д.), районов аварии (количество судов в районе, заходы в порт в районе, морские мили в районе и т. д.). В работе [13] на основе собранной статистики о морских авариях анализируются ТП и выявляется, что наиболее часто аварии, связанные с повреждением корпуса судна, заканчиваются разливом нефти. В работах [14,15] основной упор делается на человеческий фактор как основной, влияющий на вероятность аварии.

Анализ аварий с флотом, отличного от танкерного, встречается значительно реже. В основном в таких работах делается акцент на возрастной состав такого флота [16].

Как видно большинство исследований посвящено морским авариям танкеров, авариям остальных видов флота удалено недостаточное внимание, что говорит об актуальности рассматриваемой темы.

Данная статья является продолжением работы автора. Так, в работах [1,17,18] уже были рассмотрены математическая модель оценки экологического риска транспортных происшествий на водных объектах, включающая методику оценки риска с учетом вероятности ТП и экологического ущерба для судов, перевозящих грузы [1,17] и пассажиров [18]. В работе [19] была предложена методика оценки риска транспортных происшествий с учетом экологической и эксплуатационной составляющих. Расчет возможного экологического ущерба на примере ТП с сухогрузами в границах Волжского бассейна была приведена в работе [20].

Целью данной работы является апробация предложенной ранее методики оценки риска экологического и не экологического характера на примере ТП с сухогрузными судами в границах Волжского бассейна.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- дополнить базу данных по учитываемым рискам различного характера, влияющих на размер вреда (ущерба);
- определить риск ТП с учетом факторов экологического и не экологического характера;
- рассчитать совокупный риск ТП;
- проанализировать полученные результаты и провести картографирование участков с различной степенью риска.

#### **Материалы и методы**

Автор провел анализ статистической информации по транспортным происшествиям в границах Волжского бассейна за период с 2007 по 2018 годы, дополнив экологические риски данными об эксплуатационных последствиях ТП за период 1980-2005 года. Источник информации - Федеральная служба 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, время простоя, сроки расследования обстоятельств, число погибших и раненых). На основании этих данных были сформулированы факторы, оказывающие влияние на риск возникновения аварий с судами (рис.1).



Rис.1. Структура расходов после ТП

Для оценки риска ТП на водных объектах автор исходил из следующих положений:

- для экологических загрязнений в результате ТП необходимо руководствоваться экологическим законодательством в области регулирования аварийного загрязнения, уже описанным в работе [20];
- риск ТП на речном транспорте страны представляет собой сумму рисков в границах отдельных ее субъектов;
- все факторы, оказывающие влияние на риск ТП, можно разделить на группы: а) условия окружающей среды; б) интенсивность использования водных путей; в) структура эксплуатируемого флота и его характеристики; г) характер учитываемых рисков (экологические, неэкологического);
- учитываемыми источниками убытков от ТП неэкологического характера являются:
  - = потерянный фрахт в результате простоя судна;
  - = эксплуатационные расходы на ремонт, понесенные в период простоя;
  - = убытки от повреждения третьим лицам (шлюзами, причальным стенкам и др.);
  - = убытки лицам, находящимся на борту судов вовремя ТП, в результате их гибели или повреждения здоровья.

Предлагаемая математическая модель прогнозирования комплексного риска ТП, включает как экологические, так и неэкологические составляющие. По ней риск предлагается определять по формуле:

$$R_{TP} = R_{TP}^{EP} + R_{TP}^{EKP} + R_{TP}^{CP} + R_{TP}^{KP} \quad (1)$$

где  $R_{TP}^{EP}$  - экологический риск ТП;

$R_{TP}^{EKP}$  - экономические риски ТП;

$R_{TP}^{CP}$  - социальные риски ТП;

$R_{TP}^{KP}$  - косвенные риски ТП.

При оценке риска транспортных происшествий использовали статистические методы, опирающиеся на расчет частоты транспортных происшествий на различных участках и прогнозируемой величине убытков от аварий на них. Методика расчета подробно описана в работе [19].

### Результаты и обсуждение

Поскольку за период 2007-2018 годы отсутствовала статистическая информация о величине убытков и простое судов, были проанализированы данные по ТП Волжского бассейна за период 1980-2005 годы. В результате анализа этой информации были выявлены дополнительные данные, приведенные в табл.1-4.

Таблица 1

#### Данные по времени простоя и расследования обстоятельств в результате ТП

Показатель	Минимальное значение	Максимальное значение	Средне взвешенное значение
Время простоя в результате ТП, часы	0	194	4,342

Показатель	Минимальное значение	Максимальное значение	Средне взвешенное значение
Сроки расследования ТП, сут.	0	4 года	7,268
Сроки ремонта судна, сут.	1	60	21

Таблица 2  
Данные по социальным последствиям в результате ТП

Показатель	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение
Среднее число погибших в результате ТП, чел.	0	2	1
Среднее число раненых в результате ТП, чел.	0	2	1

Таблица 3  
Данные о вероятностях последствий в результате ТП

Показатель	Значение
Вероятность ТП с гибелю людей	0,012
Вероятность ТП с причинением людям вреда здоровью	0,006
Вероятность повреждения судна разной степени тяжести в результате ТП	0,902
Вероятность затопления судна в результате ТП	0,012
Вероятность повреждения имущества третьих лиц (шлюзов, причальных стенок, проводов)	0,0175

Кроме того, анализ актуальных данных Росстата и данных, полученных в результате экспертных оценок представителей судоремонтных предприятий (Борремфлот) позволил выявить некоторые стоимостные характеристики для оценки риска ТП (табл. 5). Средняя грузоподъемность судна, принятая для расчета, составила 1903 т [20].

Таблица 5  
Данные о стоимостных показателях, закладываемых в расчеты по последствиям ТП

Вид затрат	Единица измерений	Значение
Средняя заработка платы**	руб./чел.	52355
Норма дисконта	-	0,05
Средняя стоимость ремонта	тыс. руб./сут	550
Удельное значение средней провозной платы за перевозку сухогруза		
Удобрения	руб./т-сут	1490
Песчано-гравийная смесь	руб./т-сут	1290
Соль	руб./т-сут	1410

Примечание: \*\* - данные Министерства Финансов РФ <https://index.mf.gov.ua/labour/salary/world/russia/>

На основе данных были рассчитаны средне вероятные риски неэкологического характера (табл. 6) и получены суммарные значения рисков на всем протяжении Волжского бассейна (табл. 7).

**Таблица 5**  
**Средневероятные значения риска  
неэкологического характера**

Вид риска	Среднее значение убытка, млн. руб.
Ремонт поврежденного судна	11,55
Ущерб третьим лицам (ГТС, ЛЭП, причальным стенкам)	1,76

Вид риска	Среднее значение убытка, млн. руб.
Расследование обстоятельств	0,0127
Гибели членов экипажа	12,5652
Повреждение здоровья	0,0009
Недополученные доходы за время простоя	11,76

**Таблица 6**  
**Результаты расчета совокупного риска (ущерба) от ТП в Волжском бассейне (фрагмент)**

Гран ица УКТП , км	Субъект РФ	Экологи ческие риски, млн. руб./год	Экономические риски						Социальны е риски		Косвенные риски		Риск млн. руб./ год	
			Ремонт		Расследов ание		Третьим лицам							
			млн. руб.	1/ год	млн. руб.	1/ год	млн. руб.	1/ год	млн. руб.	1/ год	млн. руб.	1/ год		
524,0 - 529,0	Ярослав ская обл.	3,963	11,5 5	0,08	0,01 3	0,08	1,76	0	12,5 7	0	11,7 6	0,08	5,907	
857,0 - 858,0	Нижегоро дская обл.	11,860	11,5 5	0,25	0,01 3	0,25	1,76	0,06	12,5 7	0	11,7 6	0,25	17,80	
860,0 - 860,0	Нижегоро дская обл.	3,963	11,5 5	0,08	0,01 3	0,08	1,76	0	12,5 7	0	11,7 6	0,08	5,907	
862,0 - 869,0	Нижегоро дская обл.	43,377	11,5 5	0,91	0,01 3	0,91	1,76	0	12,5 7	0	11,7 6	0,91	64,76	
874,0 - 878,0	Нижегоро дская обл.	3,953	11,5 5	0,08	0,01 3	0,08	1,76	0	12,5 7	0	11,7 6	0,08	5,897	
884,0 - 889,0	Нижегоро дская обл.	23,480	11,5 5	0,5	0,01 3	0,5	1,76	0	12,5 7	0	11,7 6	0,5	35,14	
894,0 - 899,0	Нижегоро дская обл.	15,854	11,5 5	0,33	0,01 3	0,33	1,76	0	12,5 7	-	11,7 6	0,33	23,63	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
1190- 1190	Республи ка Чувашия	3,913	11,5 5	0,08	0,01 3	0,08	1,76	0,05	12,5 7	0,01	11,7 6	0,08	6,017	
1277- 1288	Республи ка Татарстан	8,401	11,5 5	0,33	0,01 3	0,33	1,76	0	12,5 7	0,03	11,7 6	0,33	16,50	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
1675- 1677	Самарска я обл.	6,573	11,5 5	0,17	0,01 3	0,17	1,76	0,13	12,5 7	0,01	11,7 6	0,17	8,66	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
2784- 27860	Астрахан ская обл.	15,653	11,5 5	0,33	0,01 3	0,33	1,76	0	12,5 7	0	11,7 6	0,33	23,43	
2792- 2798	Астрахан ская обл.	15,653	11,5 5	0,33	0,01 3	0,33	1,76	0	12,5 7	0	11,7 6	0,33	23,43	
2815- 2817	Республи ка Калмыкия	8,436	11,5 5	0,25	0,01 3	0,25	1,76	0	12,5 7	0,08	11,7 6	0,25	15,31	
2941- 2943	Астрахан ская обл.	7,155	11,5 5	0,25	0,01 3	0,25	1,76	0	12,5 7	0	11,7 6	0,25	12,99	
По Волжскому бассейну		410,97	-								677,7			

С помощью формулы Стерджесса и рекомендаций Иетса проведено ранжирование участков концентрации ТП по величине риска ТП с

сухогрузами с последующей классификацией по степени опасности (табл. 7).

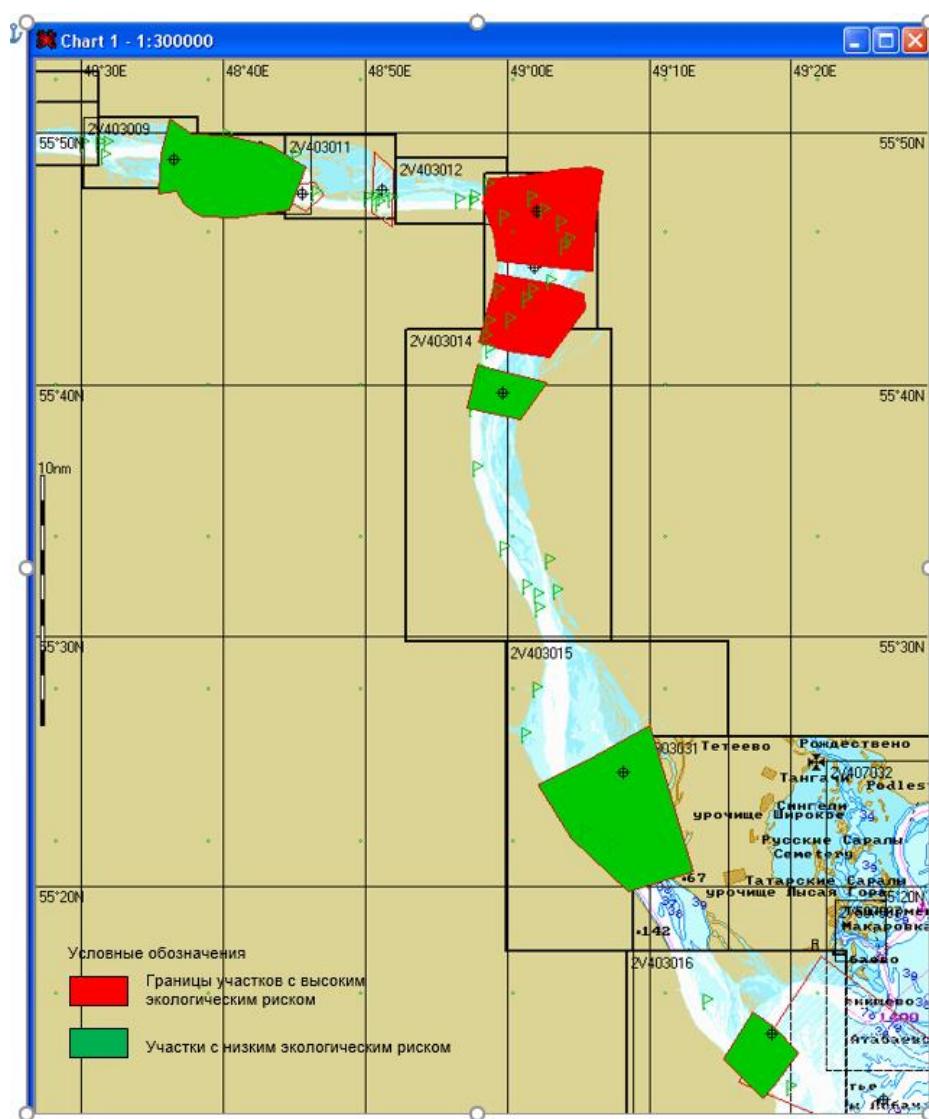
Таблица 7

**Классификация участков концентрации ТП с сухогрузами в границах Волжского бассейна по совокупному риску (ущербу)**

№ класса	Наименование	Участки-представители, км	Диапазон риска, млн. руб.
1	С высоким риском	862-869; 1303-1313; 884-889; 1314-1320; 901-902;	64,756-25,649
2	С умеренным риском	894-899; 903-906; 2643-2647; 2574-2580; 2784-2786; 2792-2798; 2581-2584; 2745-2746; 857-858; 908-920; 2726-2729; 2227-2232; 1277-1288; 1388-1393; 1527-1528;	25,649 -15,872
3	С низким риском	2815-2817; 2941-2943; 1322-1325; 2160-2168; 1353-1365; 1378-1382; 2550-2552; 1675-1677; 1731-1743; 1069-1070; 2516-2524; 1190-1190; 860-860; 874-878; 524-529; 933-936; 1922-1924	15,871-4,045

Сопоставление классификации с ранее полученной классификацией участков концентрации ТП по экологическому риску показала стабильность участков с высоким риском.

На основании разработанной классификации совокупного риска была выполнена процедура картографирования. В качестве примера в данной работе приведен фрагмент карты в границах Татарстана (рис. 2).



*Рис.2. Картографирование реки Волга в границах Татарстана по степени совокупного риска  
(фрагмент участка в гр, масштаб 1:300000)*

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

- проведена апробация разработанной ранее методики оценки риска с учетом последствий экологического и неэкологического характера;
- выявлено, что с учетом неэкологических убытков прогнозируемый риск (убыток) от ТП на 65% превышает экологический риск;

- создана классификация участков концентрации ТП по уровню риска ТП;

- сопоставление классификации участков концентрации ТП по совокупному риску и по экологическому риску выявило совпадение участков с высоким уровнем риска.

Дальнейшие исследования будут направлены на комплексную оценку риска по всем видам флота (с учетом работы танкерного флота, пассажирского флота).

### Литература

- 1 Домнин О.Л., Пластиин 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 Creber, D.J., Eldridge, L., Van Der Tak, C., Duursma, M. Review of international ship-source hazardous and noxious substances risk assessments. Proceedings - 42nd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, p. 227-245 (2019)
- 3 Gasparotti, C., Rusu, E. Methods for the risk assessment in maritime transportation in the black sea Basin. Journal of Environmental Protection and Ecology, 13(3 A), c. 1751-1759 (2012)
- 4 Creber, D.J. Koldenhof, Y. Frequency of spill model for area risk assessment of ship-source oil spills in Canadian waters, 40th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, c. 286-308 (2017)
- 5 5.Ebrahimi Baha; Ahmadi Salman; Chapi Kamran; Amjadi Hazhir Risk assessment of water resources pollution from transporting of oil hazardous materials (Sanandaj-Marivan road, Kurdistan Province, Iran), Environmental science and pollution research international, Volume 27 Issue 28, p.35814-35827 (2020) doi:10.1007/s11356-020-09886-8
- 6 Sajid Zaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, Marine pollution bulletin, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
- 7 Helle Inari; Makinen Jussi; Nevalainen Maisa; Afenyo Mawuli; Vanhatalo Jarno. Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective, Environmental science & technology, Volume 54 Issue 4. p.2112-2121(2020) doi:10.1021/acs.est.9b07086
- 8 Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; Guo Jie; Tang Cheng; Hu Xiaoke; Wang Chuanyuan; Li Baoquan Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. Marine pollution bulletin, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
- 9 Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, Ocean & Coastal Management, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocemoaman.2020.105446
- 10 Aditya Rio Prabowo, Dong Myung Bae Environmental risk of maritime territory subjected to accidental phenomena: Correlation of oil spill and ship grounding in the Exxon Valdez's case, Results in Engineering, 18 September, Volume 4, Article 100035, (2019) doi: 10.1016/j.rineng.2019.100035
- 11 Wang Likun, Yang Zaili Bayesian network modelling and analysis of accident severity in waterborne transportation: A case study in China, Reliability Engineering & System Safety 20 July 2018Volume 180 (Cover date: December 2018) Pages 277-289, doi:10.1016/j.ress.2018.07.021
- 12 Rolf J. Bye, Asbjørn L. Aalberg Maritime navigation accidents and risk indicators: An exploratory statistical analysis using AIS data and accident reports, Reliability Engineering & System Safety, Volume 176, Pages 174-186 (2018) doi: 10.1016/j.ress.2018.03.033
- 13 Likun Wang, Ruiling Huang, Caiyun Zhang Domino effect in marine accidents: Evidence from temporal association rules, Transport Policy, 11 February 2021, Volume 103, P. 236-244, (2021) doi: 10.1016/j.tranpol.2021.02.006
- 14 Lixian Fan, Mengying Wang, Jingbo Yin The impacts of risklevel based on PSC inspection deficiencies on ship accident consequences, Research in Transportation Business &Management, Volume 33, Article 100464, (2019) doi: 10.1016/j.rtbm.2020.100464
- 15 Jihong Chen, Zhongjie Di, Weipan Zhang Marine oil spill pollution causes and governance: A case study of Sanchi tanker collision and explosion, Journal of Cleaner Production, Volume 273 (2020), Article 122978, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122978
- 16 Erkan Çakır, Remz iFışkın, Coşkan Sevgili Investigation of tugboat accidents severity: An application of association rule mining algorithms, Reliability Engineering & System Safety, 19 January 2021, Volume 209 Article 107470, (2021), doi: 10.1016/j.ress.2021.107470
- 17 Домнин О.Л., Захаров В.Н., Отделкин Н.С., Пластиин А.Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-2 (42). С. 79-86.
- 18 Решняк В.И., Домнин О.Л., Пластиин А.Е., Отделкин Н.С. Экологическое обеспечение водного туризма. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 154-160.
- 19 Domnina Olga L., Plastinin Andrey E., Reshnyak Valery I. Assessment of the risk of transport accidents, considering the environmental and operational components// Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol 403

20 Домнина О.Л. Оценка риска экологических последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами на примере Волжского бассейн, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. №1 (55). С. 187-193

### References

- 1 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. № 4 part 1, C. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
- 2 Creber, D.J., Eldridge, L., Van Der Tak, C., Duursma, M. Review of international ship-source hazardous and noxious substances risk assessments. Proceedings - 42nd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, p. 227-245 (2019)
- 3 Gasparotti, C., Rusu, E. Methods for the risk assessment in maritime transportation in the black sea Basin. Journal of Environmental Protection and Ecology, 13(3 A), c. 1751-1759 (2012)
- 4 Creber, D.J. Koldenhof, Y. Frequency of spill model for area risk assessment of ship-source oil spills in Canadian waters, 40th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, c. 286-308 (2017)
- 5 Ebrahimi Baha; Ahmadi Salman; Chapi Kamran; AmjadiHazhir Risk assessment of water resources pollution from transporting of oil hazardous materials (Sanandaj-Marivan road, Kurdistan Province, Iran), Environmental science and pollution research international, Volume 27 Issue 28, p.35814-35827 (2020) doi:10.1007/s11356-020-09886-8
- 6 Sajid Zaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, Marine pollution bulletin, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
- 7 Helle Inari; Makinen Jussi; Nevalainen Maisa; Afenyo Mawuli; Vanhatalo Jarno. Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective, Environmental science & technology, Volume 54 Issue 4. p.2112-2121(2020) doi:10.1021/acs.est.9b07086
- 8 Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; GuoJie; Tang Cheng; Hu Xiaoke; Wang Chuanyuan; Li Baoquan Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. Marine pollution bulletin, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
- 9 Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, Ocean & Coastal Management, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105446
- 10 Aditya Rio Prabowo, Dong Myung Bae Environmental risk of maritime territory subjected to accidental phenomena: Correlation of oil spill and ship grounding in the Exxon Valdez's case, Results in Engineering, 18 September, Volume 4, Article 100035, (2019) doi: 10.1016/j.rineng.2019.100035
- 11 Wang Likun, Yang Zaili Bayesian network modelling and analysis of accident severity in waterborne transportation: A case study in China, Reliability Engineering & System Safety 20 July 2018Volume 180 (Cover date: December 2018) Pages 277-289, doi:10.1016/j.ress.2018.07.021
- 12 Rolf J. Bye, Asbjørn L. Aalberg Maritime navigation accidents and risk indicators: An exploratory statistical analysis using AIS data and accident reports, Reliability Engineering & System Safety, Volume 176, Pages 174-186 (2018) doi: 10.1016/j.ress.2018.03.033
- 13 Likun Wang, Ruiling Huang, Caiyun Zhang Domino effect in marine accidents: Evidence from temporal association rules, Transport Policy, 11 February 2021, Volume 103, P. 236-244, (2021) doi: 10.1016/j.tranpol.2021.02.006
- 14 Lixian Fan, Mengying Wang, Jingbo Yin The impacts of risklevel based on PSC inspection deficiencies on ship accident consequences, Research in Transportation Business &Management, Volume 33, Article 100464, (2019) doi: 10.1016/j.rtbm.2020.100464
- 15 Jihong Chen, Zhongjie Di, Weipan Zhang Marine oil spill pollution causes and governance: A case study of Sanchi tanker collision and explosion, Journal of Cleaner Production, Volume 273 (2020), Article 122978, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122978
- 16 Erkan Çakır, Remzi Fışkın, Coşkan Sevgili Investigation of tugboat accidents severity: An application of association rule mining algorithms, Reliability Engineering & System Safety, 19 January 2021, Volume 209 Article 107470, (2021), doi: 10.1016/j.ress.2021.107470
- 17 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.
- 18 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.
- 19 Domnina Olga L., Plastinin Andrey E., Reshnyak Valery I. Assessment of the risk of transport accidents, considering the environmental and operational components// Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol 403
- 20 Olga L. Domnina Risk Assessment of Environmental Consequences from Transport Accidents with Dry Cargo Vessels on the Example of the Volga Basin, Marine intellectual technologies. 2022. №1 part 1. pp. 187-193

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**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), assistant professor, Scientific Secretary, Volga State University of Water Transport, Nesterova st., 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 629.12.001.24:681.32

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.030>

### Исходные модели для построения целевых функций морских гражданских судов при определении их характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования

А.С. Огай<sup>1</sup> [ogay\\_A@msun.ru](mailto:ogay_A@msun.ru), М.В. Войлошников<sup>1</sup> [michael.vladlen@gmail.com](mailto:michael.vladlen@gmail.com), С.А. Огай<sup>1</sup> [ogay@msun.ru](mailto:ogay@msun.ru)

<sup>1</sup>Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

**Аннотация.** На начальных стадиях проектирования морских гражданских судов основных типов, в частности, транспортных и промысловых, при нахождении их оптимальных характеристик и элементов с применением целевых функций и методов оптимизации по экономическим критериям, в том числе, системных принципов сопоставимости и проектных ограничений важным инструментом выступает математическая модель, которая служит формой целевой функции и включает последовательности зависимостей между исходными данными (проектными ограничениями), искомыми переменными и параметрами (постоянными значениями элементов судна, например, принятых конструктивно при нахождении оптимальных характеристик), с одной стороны, и экономическими показателями (инвестиций, эксплуатационных расходов и эффекта, а также дохода), с другой стороны. Рассмотренные исходные математические модели морских гражданских судов, предназначенные для использования в указанных целях, охватывают определение таких характеристик и показателей судна, как: размер (водоизмещение в грузу, дедвейт, тоннаж и пр.), характеристики эффективной мощности и эксплуатационной скорости, элементы рейсового цикла, годовой эффект (проводоспособность и продуктивность по добытой, переработанной и доставленной рыбопродукции), совокупный годовой доход, эксплуатационные расходы, стоимость замещения судна (затраты на его постройку в рыночных ценах), показатели: приведенных затрат, удельных (на единицу эффекта) приведенных затрат и внутренней нормы прибыли.

**Ключевые слова:** математическая модель, проектирование судна, характеристика судна, проектный элемент судна, проектная оптимизация, критерий эффективности, критерий оптимальности, целевая функция, проектные ограничения, уравнение баланса водоизмещения

**Благодарности:** авторы выражают благодарность Анатолию Ивановичу Азовцеву за полезные советы по формированию целевых функций.

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

**Для цитирования:** Огай А.С., Войлошников М.В., Огай С.А. Исходные модели для построения целевых функций морских гражданских судов при определении их характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 226—237.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.030>

### The basic models for the objective functions creating of merchant ships in determining their characteristics and particulars at the initial stages of designing

Alexey S. Ogai<sup>1</sup> [ogay\\_A@msun.ru](mailto:ogay_A@msun.ru), Michael V. Voyloshnikov<sup>1</sup> [michael.vladlen@gmail.com](mailto:michael.vladlen@gmail.com)

Sergei A. Ogai<sup>1</sup> [ogay@msun.ru](mailto:ogay@msun.ru)

<sup>1</sup>Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Russian Federation

**Abstract.** At the initial stages of designing of merchant ships of the main types, in particular, the transport ships and the fishery ones, when finding their optimal characteristics and particulars using the objective functions and optimization approaches according to economic criteria, as well as systemic concepts of the comparability and the design constraints, an important tool is the mathematical model, which acts as the form of objective function and includes the sequences of dependencies between the initial data (the design constraints), the variables sought and the parameters (the values of particulars of the ship assuming constant when determining the variables), on the one hand, and economic indicators (the investments, the operating costs and the effect, as well as income), on the other hand. The considered basic mathematical models of the merchant ships, which are intended for use for the indicated purposes, cover the definition of such characteristics and indicators of the ship as: the size (the cargo displacement, the design deadweight, the tonnage, etc.), characteristics of effective power and the operating velocity, the elements of the voyage cycle, the annual effect (transport carrying capacity and the productivity of caught, processed and delivered fish products), the annual income total, the operating costs, replacement cost of the ship (the construction costs in market prices), the indexes: the present worth, the specific present worth (per effect unit), the internal rate of return, etc.

**Keywords:** the mathematical model, the ship design, design characteristic, design particular, design optimization, efficiency criterion, optimality criterion, objective function, design constraints, displacement balance equation.

**Acknowledgments:** The authors are grateful to Anatoly Azovtsev for useful advice on the formation of objective functions.

**Financial Support:** The study was carried out within of the assignment of the Maritime state university named Admiral Nevelskoi.

**For citation:** Alexey S. Ogai, Michael V. Voyloshnikov, Sergei A. Ogai The basic models for the objective functions creating of merchant ships in determining their characteristics and particulars at the initial stages of designing, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 226—237.

## Введение

Для нахождения элементов и характеристик морских гражданских судов на разных этапах их проектирования учитываются как требования к мореходности [1, 2, 4], так и эксплуатационные показатели, а также экономические критерии [3, 5, 12], которые в той или иной мере детализации могут применяться в форме целевых функций при оптимизации характеристик и элементов судна [6–10].

Для построения целевых функций морских гражданских судов при определении их характеристики и элементов на начальных стадиях проектирования методически удобно применять базовые (исходные) модели, которые можно охарактеризовать как достаточно простые последовательности зависимостей, которые тем не менее устанавливают связь между данными (проектными ограничениями), искомыми характеристиками или элементами судна, а также параметрами (условно постоянными элементами судна), с одной стороны, и показателями, характеризующими экономическую эффективность судна, с другой стороны.

Помимо непосредственного применения исходных (базовых) моделей для решения тех или иных качественных задач, например, для анализа влияния проектных ограничений на оптимальные значения характеристик и элементов судна, эти модели могут также использоваться в качестве основы для их дальнейшего уточнения и усложнения с целью практического использования при проектировании, или в качестве основы для планирования научных работ, которые в таком случае направлены на усовершенствование исходных (базовых) моделей в указанных выше целях.

## Оценка размеров транспортного судна, эффективной мощности и эксплуатационной скорости

Последовательное использование рассмотренных ниже формул в составе алгоритма позволяет найти основные экономические показатели транспортного судна в зависимости от исходных данных (проектных ограничений), от варьируемых характеристик судна при поиске их оптимальных значений, например, характеристик размера судна и мощности силовой установки, а также от значений элементов (соотношений размерений) судна, которые на начальных стадиях проектирования при определении оптимальных характеристик судна можно в исходной модели рассматривать приближенно соответствующими элементам использованных при построении формул аналогов.

По формуле, полученной на основе статистических наблюдений стоимость замещения  $RC$  сухогрузного кранового и контейнерного судна, используя проектный дедвейт  $DW$  как единицу сравнения, можно найти как

$$RC = 0,0201 \times (DW/0,159)^{1,2313}, \text{тыс. долл. США} \quad (1)$$

Определение водоизмещения  $D$  в зависимости от проектного дедвейта  $DW$  для подобных транспортных судов с применением уравнения баланса масс

$$0,71 \times D - 0,43 \times D^{1/2} - DW = 0 \quad (2)$$

имеет вид

$$D = 0,4959 \times (0,43 + \sqrt{0,185 + 2,84 \times DW})^2, \text{т} \quad (3)$$

Требуется отметить, что при описании исходных моделей гражданских судов (транспортного и промыслового) применяются общие правила размерностей, т.е. значения применяемых математических величин могут иметь любые согласованные размерности, если они не указаны при формулах, графиках, в табличных данных или для используемых констант, а также, если размерности не следуют в соответствии с соотношением величин в этих формулах.

При нахождении экономических показателей морского судна в качестве денежных размерностей распространено применение долларов США, что связано с обычно используемой валютой на рынках в судостроении и судоходстве с учетом широкой международной кооперации в указанных отраслях. Для перевода показателей в рубли может применяться зависящий от даты показатель официального обменного курса рубля, публикуемый Банком России ([www.cbr.ru](http://www.cbr.ru)).

Для построения графиков показателей транспортного кранового сухогрузного и контейнерного судна и для анализа разрабатываемых исходных моделей, предназначенных для нахождения экономических показателей, критерии эффективности и оптимальных характеристик судов по найденным критериям в качестве общих данных в иллюстративных примерах ниже применяются следующие значения: протяженность морской рейсовой линии 5 000 морских миль, экипаж судна 20 чел., средние затраты на содержание одного члена экипажа 24 тыс. долл. США в год, стоимость используемого топлива 0,53 тыс. долл. США/т, длительность годового эксплуатационного периода 330 сут [6], коэффициент загрузки в обратном рейсе 50 %, транспортный тариф на рассматриваемой линии в расчете на единицу груза 0,15 тыс. долл.

США/т, ставка дисконтирования 15 % (суммарный показатель коммерческих рисков).

Эффективная мощность  $Ne$  (или EPS), т.е. мощность на фланце вала главного двигателя или главного редуктора по формуле Адмиралтейских коэффициентов для сухогрузного кранового и контейнерного судна определяется как

$$Ne = D^{1/2} \times v_S^{2.5} / C_{ADM} \approx D^{1/2} \times v_S^{2.5} / 21,4, \text{ кВт} \quad (4)$$

а характер зависимости эффективной мощности  $Ne$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_S$  показан на функциональной поверхности (Рис. 1).

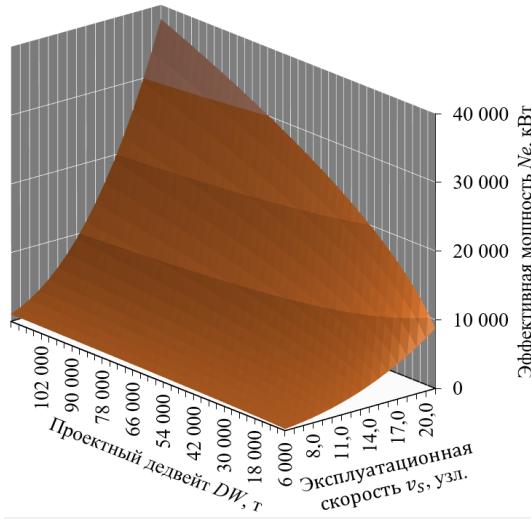


Рис. 1. Зависимость эффективной мощности  $Ne$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_S$

В соответствии с этой формулой эксплуатационная скорость  $v_S$  судна в зависимости от эффективной мощности  $Ne$  и от водоизмещения в грузу  $D$  можно найти как

$$v_S = ((Ne \times 21,4) / D^{1/2})^{0,4}, \text{ узл.} \quad (4)$$

#### Прогнозирование рейсового показателей транспортного судна

Суточный расход топлива на ходу судна в зависимости от эффективной мощности можно приближенно найти как

$$q_1 \approx 0,0054 \times Ne, \text{ т/сут,} \quad (4)$$

суточный расход топлива на стоянках в портах под погрузкой и выгрузкой по статистическим наблюдениям равен ориентировочно:  $q_2 \approx 0,0013 \times Ne, \text{ т/сут.}$

Ходовое время судна в течение кругового рейса равно

$$t_R = 2 \times \xi / (24 \times v_S), \text{ сут,} \quad (6)$$

где,  $\xi$  – протяженность рейсовой линии между портами отправления и назначения, морских миль.

При определении длительности стоячного времени  $t_G$  должны учитываться не только работы по приему и передаче груза, но также, прием снабжения (пресной воды, передача сточных,

нефтесодержащих и фекальных вод, маслосодержащих вод, прием продуктов, передача мусора, бытовых отходов и пр.). Длительность стоянки под погрузкой и выгрузкой  $t_G$  с учетом этого условия определяется в зависимости от дедвейта  $DW$ , а не от чистой грузоподъемности  $P_G$ .

Длительность стоянки под погрузкой в течение кругового рейса (т.е. продолжительность грузовых операций в портах отправления и назначения)  $t_G$  в составе исходной модели находится с учетом проектного дедвейта судна  $DW$ , коэффициентов использования (утилизации) проектного дедвейта по грузоподъемности  $P_G$  в прямом:  $\eta_{G1} = P_G / DW$  ( $\eta_{G1} \approx 1,0$ ) и в обратном переходах:  $\eta_{G2} = P_G / DW$  и значений суточной производительности по грузовым операциям в порту отправления  $q_{G1}$  и в порту назначения  $q_{G2}$  (т/сутки), при этом суммарная продолжительность грузовых операций в течение кругового рейса равна

$$t_G \approx DW \times (1,0 + \eta_{G2}) \times (1/q_{G1} + 1/q_{G2}), \text{ сут} \quad (7)$$

Значения суточной нормы грузообработки в портах отправления и назначения для кранового сухогрузного и контейнерного судна на начальных этапах определения оптимальных характеристик можно в первоначальном приближении принять равными

$$q_{G1} \approx q_{G2} \approx 1300 + 0,135 \times DW, \text{ т/сутки.} \quad (8)$$

Общая длительность кругового рейса равна

$$T_{RG} = t_R + t_G + t_M, \quad (9)$$

где  $t_M$  – суммарная продолжительность маневрирования судна в течение кругового рейса (для построения графиков показателей транспортного кранового сухогрузного и контейнерного судна и для анализа разрабатываемых исходных моделей суммарная продолжительность маневрирования может быть принята равной:  $t_M \approx 1,0$  сут).

$$T_{RG} = 2 \times \xi / (24 \times v_S) + P_G \times (1 + \eta_{G2}) \times (1/q_{G1} + 1/q_{G2}) + 1,0, \text{ сут} \quad (10)$$

Количество круговых рейсов, осуществляемых судном в течение годового эксплуатационного периода, равно

$$n_R = T_{EXP} / T_{RG} \approx 330 / T_{RG}, \quad (11)$$

где,  $T_{EXP} \approx 330$  сут – применяемое значение длительности годового эксплуатационного периода, соответствует статистическим исследованиям [6] (в Приложении к указанной книге).

Зависимость количества круговых рейсов  $n_R$ , осуществляемых судном в течение годового эксплуатационного периода, от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_S$  показана на функциональной поверхности (Рис. 2).

Годовой объем перевозок (функция полезности в составе критериев эффективности показатель экономического эффекта в натуральном измерении,

годовая провозоспособность транспортного судна) с учетом коэффициентов загрузки определяется, как

$$Q = n_R \times DW \times (\eta_{G1} + \eta_{G2}), \text{т/год.} \quad (12)$$

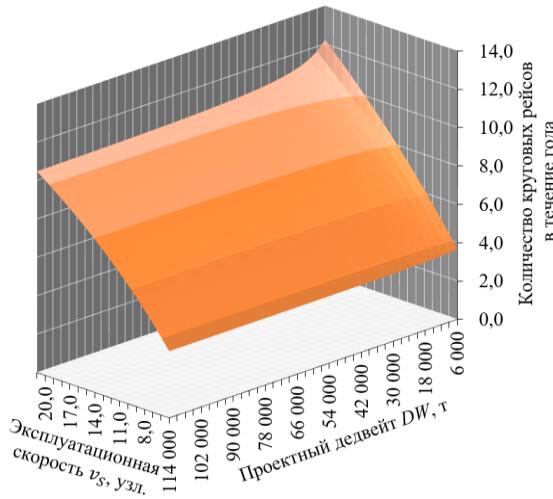


Рис. 2. Зависимость количества круговых рейсов  $n_R$  в течение года от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$

Зависимость годового объема перевозок  $Q$  (эффекта) от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$  показана на функциональной поверхности (Рис. 3).

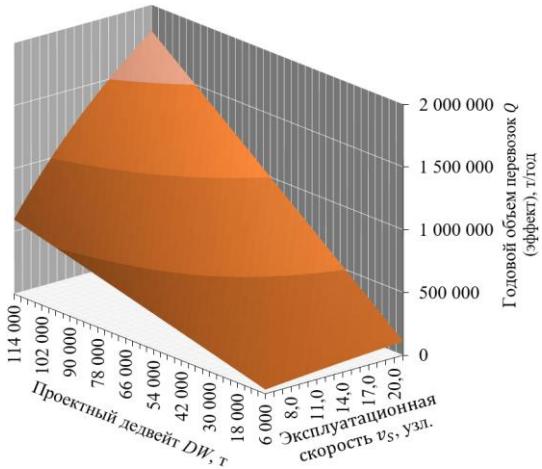


Рис. 3. Зависимость годового объема перевозок  $Q$  (эффекта) от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$

### Экономические показатели транспортного судна

Совокупный годовой доход равен

$$I = Q \times m, \quad (13)$$

где  $m$  – тариф (тарифная ставка) за перевозку единицы груза на заданной рейсовой линии.

Зависимость показателя совокупного годового дохода  $I$  от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$  геометрически соответствует аналогичной зависимости годового объема перевозок и показана на функциональной поверхности (Рис. 4).

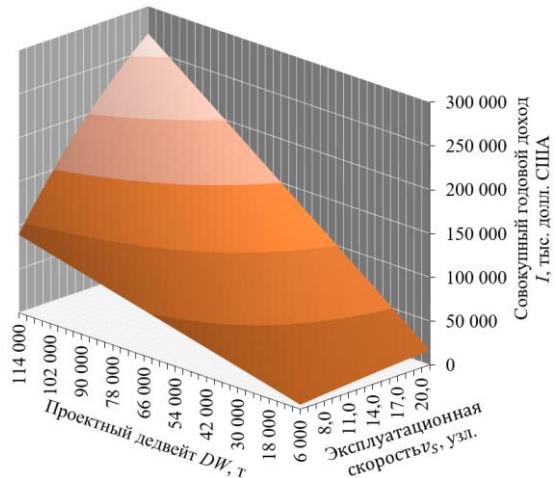


Рис. 4. Зависимость совокупного годового дохода  $I$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$

Годовые эксплуатационные расходы  $C$  для транспортного судна включают следующие основные слагаемые (укрупненные группы затрат) и равны

$$C = C_{CR} + C_{FE} + C_{EX} + C_{SC} + C_{FL} + C_{SP} + C_{RM} + C_G + C_{MM}, \quad (14)$$

где,  $C_{CR}$  – затраты на оплату труда и содержание экипажа (а также, обслуживающего персонала),  $C_{FE}$  – затраты на коллективное питание экипажа,  $C_{EX}$  – затраты на доставку экипажа (судном или другими транспортными средствами),  $C_{SC}$  – совокупные выплаты во внебюджетные фонды,  $C_{FL}$  – годовые расходы на топливо,  $C_{SP}$  – затраты на снабжение,  $C_{RM}$  – средние годовые расходы на техническое обслуживание судна и ремонт,  $C_G$  – расходы на общее обслуживание,  $C_{MM}$  – административные расходы, затраты на менеджмент и маркетинг.

Годовые расходы на ремонт  $C_{RM}$  составляют приближенно 2,0 % (1,0 ÷ 3,0 %) [5, 12] от восстановительной стоимости судна  $RC$ :  $C_{RM} = 0,02 \times RC$ .

Расходы на содержание экипажа, включая затраты на оплату труда  $C_{CR}$ , а также, на питание  $C_{FE}$  и на доставку экипажа  $C_{EX}$  (которые в рамках приемлемого начального приближения можно учесть ставкой около 10 % от расходов на оплату экипажа, кроме отчислений во внебюджетные фонды  $C_{SC}$ , определяемых нормативно), составляют

$$C_{CR} + C_{FE} + C_{EX} \approx 1,10 \times n_{CR} \times c_{CR}. \quad (15)$$

Совокупные выплаты во внебюджетные фонды  $C_{SC}$  могут учитываться в совокупности с расходами на оплату труда экипажа  $C_{CR}$  по ставке 0,30, что характерно для правил определения этих выплат в РФ значение ставки найдено по слагаемым: на обязательное пенсионное страхование 22 %, на социальное страхование по нетрудоспособности и материнству 2,9 %, на обязательное медицинское страхование 5,1 %. Отчисления во внебюджетные фонды в сумме равны

$$C_{CR} \approx 0,30 \times n_{CR} \times c_{CR}. \quad (16)$$

Слагаемые операционных расходов судна, связанных с содержанием экипажа, выплаты во внебюджетные фонды  $C_{SC}$ , в фонд социального страхования, с учетом найденных пропорций величин:  $C_{CR}$ ,  $C_{FE}$ ,  $C_{EX}$  и  $C_{SC}$  в сумме приближенно равны

$$C_{CR} + C_{FE} + C_{EX} + C_{SC} \approx 1,40 \times n_{CR} \times c_{CR}, \quad (17)$$

где  $n_{CR}$  – экипаж судна, чел.;  $c_{CR}$  – средние годовые расходы на содержание в расчете на одного человека в экипаже судна.

Затраты на топливо и моторное масло в течение года равны

$$C_{FL} = n_R \times ((t_R + t_M) \times q_1 + t_G \times q_2) \times c_{FL}^*, \quad \text{тыс. долл. США}, \quad (18)$$

где  $c_{FL}^*$  – значение цены одной тонны применяемого дизельного топлива, тыс. долл. США/т.

Характерные значения цены одной тонны применяемого дизельного топлива (флотского мазута IFO380)  $c_{FL}^*$  приведены на Схеме в географической привязке (Рис. 5)



Рис. 5. Географическое распределение текущих цен  $c_{FL}^*$  на судовое топливо (флотский мазут IFO380)  
<https://shipandbunker.com/prices#IFO380>

Цена одной тонны применяемого на транспортном судне с малооборотным двигателем флотского мазута IFO380 приближенно составляет

$$c_{FL}^* = 0,49 \div 0,57 \approx 0,53 \text{ тыс. долл. США/т}, \quad (19)$$

Затраты на снабжение судна в течение года приближенно равны

$$C_{SP} = (0,02 \div 0,08) \times C_{FL} \approx 0,05 \times C_{FL} \text{ тыс. долл. США}, \quad (20)$$

В совокупности затраты на топливо и снабжение составляют

$$C_{FL} + C_{SP} \approx 1,05 \times (n_R \times ((t_R + t_M) \times q_1 + t_G \times q_2) \times c_{FL}^*), \quad \text{тыс. долл. США}, \quad (21)$$

Слагаемые операционных затрат, связанные с годовой провозоспособностью транспортного судна  $Q$ , в частности: общие расходы по обслуживанию судна  $C_G$ , затраты на осуществление менеджмента и маркетинга  $C_{MM}$  могут на начальных стадиях определения проектных характеристик быть приближенно найдены как

$$C_G + C_{MM} \approx 0,02 \times I, \quad \text{тыс. долл. США}. \quad (22)$$

Годовые операционные расходы  $C$  (т.е. эксплуатационные) после подстановки значений в формулу (14) можно найти как

$$C = 1,40 \times n_{CR} \times c_{CR} + C_{FL} + C_{SP} + 0,02 \times RC + 0,02 \times I \quad \text{тыс. долл. США}, \quad (23)$$

Зависимость показателя годовых эксплуатационных расходов  $C$  от размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_S$  показана на функциональной поверхности (Рис. 6).

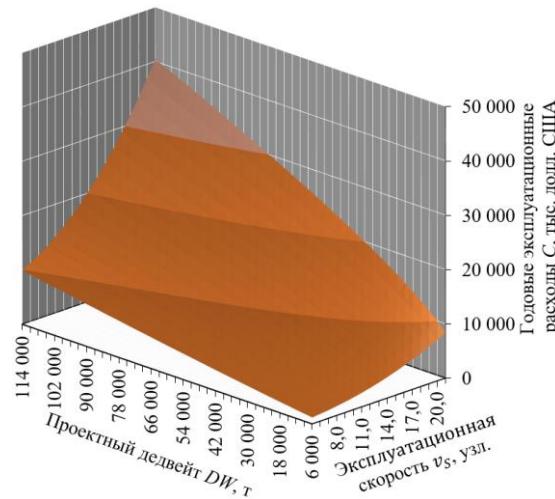


Рис. 6. Зависимость годовых эксплуатационных расходов  $C$  от размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_S$

Для использования судна на условиях самоокупаемости и хозяйственного расчета необходим, также, определенный запас оборотных средств  $WA$ , главным образом для осуществления авансовых платежей по эксплуатационным затратам (если подразумевается, что перевозимый груз не принадлежит судовладельцу, имеющему судно и оборотные средства), оборотные средства равны

$$WA = C \times T_{RG} / T_{EXP} \approx C \times T_{RG} / 330 \quad (24)$$

#### Экономические критерии служащие целевыми функциями при определении оптимальных характеристик и элементов судна

Использование при определении оптимальных характеристик на начальных стадиях проектирования судна минимизируемого критерия в форме приведенных затрат требует применение ограничений в соответствии с принципами системного подхода. Показатель приведенных затрат определяется как

$$PW = C + (RC + WA) \times i \quad (25)$$

Математические величины:  $C$ ,  $RC$  и  $WA$ , входящие в формулу (25) выступают функциями в зависимости от ограничений, задаваемых при нахождении характеристик судна, например, от общих данных, используемых при построении графических зависимостей, что рассмотрено выше, от самих варьируемых искомых характеристик, например из числа:  $D$ ,  $DW$ ,  $PG$ ,  $GRT$ ,  $NRT$ ,  $Ne$ ,  $N_{CE}$ ,  $v_S$  и т.д. (выключая водоизмещение в грузу, проектный дедвейт, грузоподъемность, валовую и чистую регистровую вместимость, эффективную мощность, эксплуатационную скорость и пр.), и от параметров

задачи – значений элементов судна, к которым можно отнести размерения судна и их соотношения:  $L$ ,  $B$ ,  $H$ ,  $T$ ,  $b_w$ ,  $L/B$ ,  $B/T$ ,  $H/T$ ,  $L/H$ , др. (длину, ширину, высоту борта, осадку судна, коэффициент общей полноты, соотношения размерений судна и пр.), считаемые при определении его характеристик условно постоянными и заданными, например с использованием аналогов.

Целевая функция показателя приведенных затрат  $PW$  в зависимости от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$  показана на функциональной поверхности (Рис. 7).

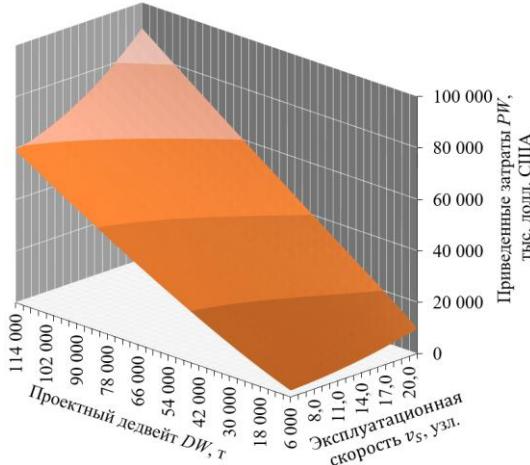


Рис. 7. Зависимость показателя приведенных затрат  $PW$  от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$

Используя показанный экономический критерий приведенных затрат  $PW$ , выступающий обобщением показателей:  $C$ ,  $RC$  и  $WA$ , которые приведены к сопоставимому виду посредством экономического дисконтирования по ставке  $i$  (показатель дисконтирования соответствующий сумме коммерческих рисков и показывающий, в то же время, стоимость использования инвестиций), можно найти критерий в форме удельных приведенных затрат ( $PW/Q$ ) с учетом годовой провозоспособности судна

$$PW/Q = (C + (RC + WA) \times i)/Q \quad (26)$$

Целевая функция показателя удельных приведенных затрат ( $PW/Q$ ) в зависимости от характеристики размера судна, в частности, дедвейта  $DW$ , и от эксплуатационной скорости  $v_s$  показана на функциональной поверхности (Рис. 8).

Экономический показатель внутренней нормы прибыли ( $IRR$ , Internal rate of return) формально отличается от показателя рентабельности инвестиций, т.к. вносится корректировка на величину инфляции (на показатель темпа прироста индекса потребительских цен). При малой инфляции, что, в частности, характерно для юрисдикций с развитым гражданским судостроением, можно при определении целевой функции на начальных

стадиях проектирования судна считать указанные показатели методически близкими.

Внутренняя норма прибыли равна

$$IRR = (I - C)/(RC + WA) \quad (27)$$

Целевая функция в форме максимизируемого показателя внутренней нормы прибыли  $IRR$  от размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$  д. показана на функциональной поверхности (Рис. 9) для вариантов данных.

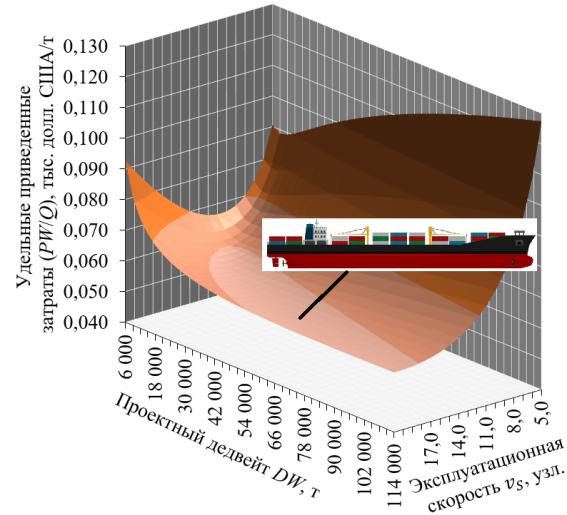


Рис. 8. Зависимость показателя удельных приведенных затрат  $PW/Q$  от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$

#### Оценка размеров, эксплуатационной скорости, и элементов эксплуатационного цикла в составе целевой функции промыслового судна

Для построения графиков и изучения базовой модели определения показателей морского добывающе-перерабатывающего промыслового судна используется следующая совокупность исходных данных: расстояние от порта базирования и места доставки улова до района промысла 2000 морских миль, экипаж судна 50 чел., средние расходы на содержание одного члена экипажа в течение года 24 тыс. долл. США/чел., стоимость моторного дизельного топлива, применяемого на судне 0,8 тыс. долл. США/т, длительность годового эксплуатационного периода 330 сут, стоимость 1,75 тыс. долл. США/т готовой рыбопродукции, доставленной в порт, соотношение массы готовой рыбопродукции к массе улова (сырой рыбы) 0,50, затраты на покупку квоты на вылов водных биологических ресурсов (рыбы пелагических видов), на покупку тары, сепарации в трюме и на пополнение орудий лова 0,20 тыс. долл. США в расчете на тонну улова (сырой рыбы), доля груза в составе дедвейта при возвращении судна 0,90, доля топлива (для собственных нужд, бункерного) и снабжения в составе дедвейта при выходе судна в рейс 0,50, ставка дисконтирования 15 % (суммарный показатель коммерческих рисков).

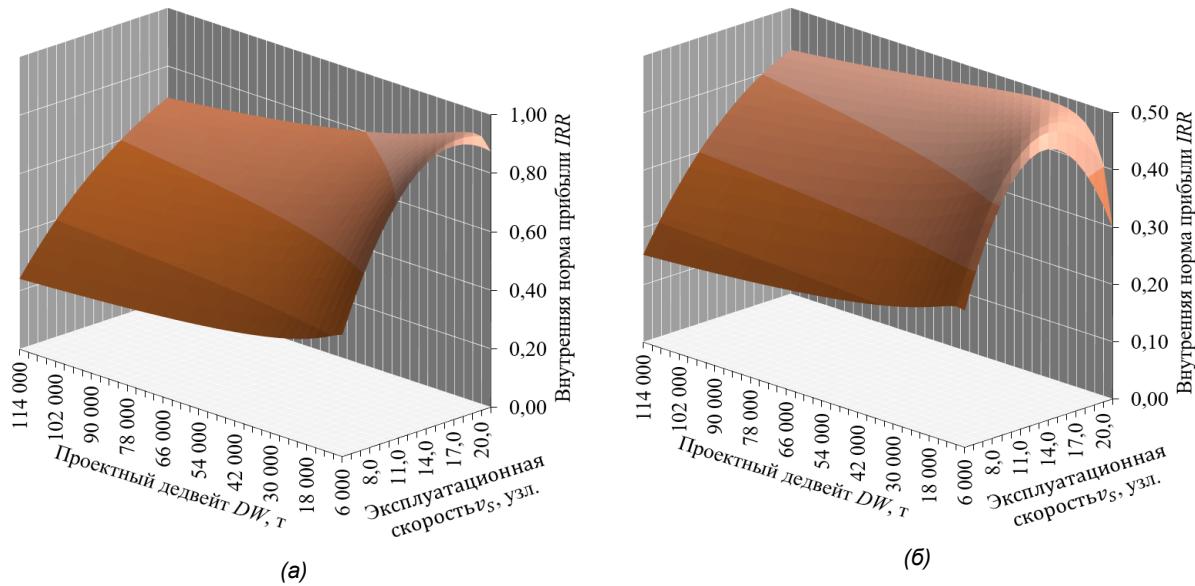


Рис. 9. Зависимость внутренней нормы прибыли  $IRR$  от размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$  для вариантов данных: а) транспортный тариф  $t=0,15$  тыс. долл. США/т; б) тариф  $t=0,10$  тыс. долл. США/т

С использованием данных аналогов определяется адмиралтейский коэффициент  $C_{ADM}$ , который для морских стальных промысловых судов равен приближенно:  $C_{ADM} \approx 13,5$ . Соответственно скорость судна  $v_s$  на переходе в зависимости от эффективной мощности  $Ne$  и от размера судна  $D$  можно определить как

$$v_s \approx (Ne \times 13,5/D^{1/2})^{0,4}, \text{ узл.} \quad (28)$$

В свою очередь, размер морского стального промыслового судна (водоизмещение в грузу  $D$ ) можно переопределить через характеристику проектного дедвейта  $DW$ , что удобно для дальнейшего использования формулы в составе исходной модели на начальных стадиях определения оптимальных проектных характеристик. Уравнение баланса масс для судов этого типа можно представить в следующем виде

$$0,45 \times D - 2,5 \times D^{1/2} - DW = 0, \quad (29)$$

решение имеет вид

$$D = 1,2346 \times (2,5 + \sqrt{6,25 + 1,8 \times DW})^2. \quad (30)$$

При замене характеристики размера судна на проектный дедвейт  $DW$  в формуле (28) зависимость эксплуатационной скорости  $v_s$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$  показана на функциональной поверхности (Рис. 10).

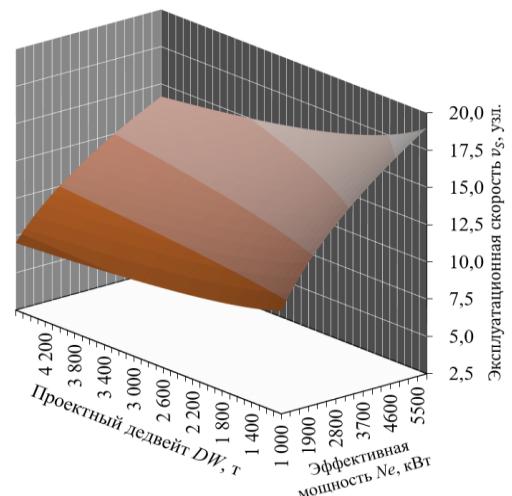


Рис. 10. Зависимость эксплуатационной скорости  $v_s$  промыслового судна от характеристики его размера (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$

#### Показатели в составе исходной модели морского стального промыслового судна

Стоимость замещения  $RC$  для нового морского стального промыслового судна может быть найдена по формуле, полученной на основе статистических наблюдений

$$RC = (87,7 \times DW^{0,678} + 4,23 \times Ne^{0,98})/2, \text{ тыс. долл. США.} \quad (31)$$

Зависимость стоимости замещения  $RC$  морского стального промыслового судна от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$  показана на графической функциональной поверхности (Рис. 11).

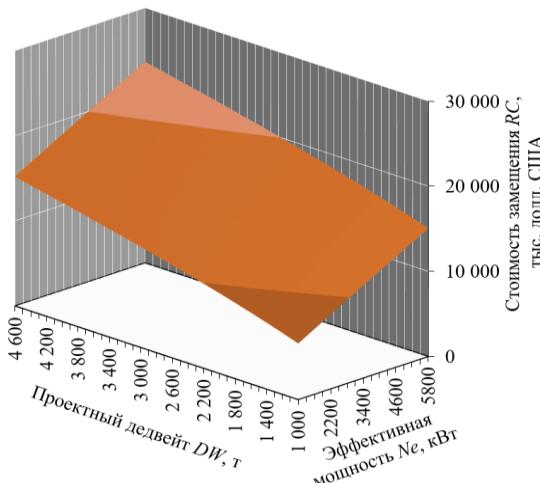


Рис. 11. Зависимость стоимости замещения  $RC$  промыслового судна от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$

На начальных стадиях определения проектных характеристик годовые эксплуатационные расходы  $C$  для морского стального промыслового судна можно найти в виде суммы

$$C = C_{CR} + C_{FE} + C_{EX} + C_{SC} + C_{RQ} + C_{INST} + C_{MS} + C_{FL} + C_{SP} + C_{RM} + C_G + C_{MM}, \quad (32)$$

где, условные обозначения затрат, отличающиеся от применяемых в составе исходной модели транспортного судна (14):  $C_{RQ}$  – затраты на покупку квоты (плата за использование водных биологических ресурсов, нормативно определена в Налоговом кодексе РФ),  $C_{INST}$  – расходы на компенсацию износа и пополнения орудий лова,  $C_{MS}$  – расходы на приобретение материалов: сепарации, тары, технологических веществ.

Рассматриваемый при составлении исходной модели морского стального добывающего-перерабатывающего судна вариант его использования включает лов рыбы, переработку и выпуск продукции (мороженой), а также автономную доставку переработанной рыбопродукции в порт назначения. Иной вариант использования судна, при котором рыба в море передается на транспортное судно для доставки в порт, а с транспортного судна на промысловое передается топливо и снабжение, не имеет формальных отличий от рассматриваемого варианта, поскольку означает автономную перевозку рыбопродукции промысловым судном на нулевое расстояние, при этом имеются количественные отличия применяемых исходных данных при неизменной последовательности расчетов.

Длительность ходового времени в течение кругового рейса определяется по формуле (6), где  $\xi$  – расстояние до района промысла от порта базирования.

Длительность погрузочно–разгрузочных работ и приема в трюмы добываемой и перерабатываемой рыбопродукции в течение кругового рейса определяется в сумме:  $t_{AR} + t_{FS}$ .

При определении длительности погрузочно–разгрузочных работ и приема в трюмы рыбопродукции учитываются следующие элементы:

грузоподъемность судна:  $P_G = DW \times \eta_{G1}$ , где  $\eta_{G1}$  – коэффициент утилизации проектного дедвейта судна по грузоподъемности, включая груз рыбы и груз снабжения при выходе в рейс (в первом приближении можно принять:  $\eta_{G1} \approx 0,9$ );

суточная продуктивность погрузочных операций  $q_{G1}$  и суточная интенсивность производства готовой рыбопродукции на промысле  $q_{G2}$

Длительность погрузочно–разгрузочных работ и приема в трюмы в течение кругового рейса равна

$$t_{AR} + t_{FS} = DW \times (\eta_{G1} + \eta_{G2})/q_{G1} + DW \times \eta_{G1}/q_{G2}, \text{ сут}, \quad (33)$$

где  $\eta_{G2}$  – коэффициент утилизации проектного дедвейта судна по грузу снабжения:  $\eta_{G2} = P_{SPL}/DW$ ;  $P_{SPL}$  – максимальное количество снабжения, принимаемого на промысловое судно в рейс, т.

По данным аналогов для начальных приближений суточную производительность по выпуску мороженой рыбопродукции можно в зависимости от эффективной мощности  $Ne$  судна и от его размера (характеристики дедвейта  $DW$ ) найти как

$$\begin{aligned} q_{G2} &\approx 30 + 0,035 \times (Ne - 900), \text{ сут.} \\ q_{G2} &\approx 2,95 \times DW^{1/2}, \text{ сут.} \end{aligned} \quad (34)$$

Длительность кругового рейса промыслового судна равна

$$T_{RG} = t_R + t_{AR} + t_{FS} + t_M, \quad (35)$$

где,  $t_R$  – ходовое время в течение кругового рейса;  $t_M$  – средняя длительность маневрирования на промысле в течение кругового рейса;  $t_{AR}$  – длительность нахождения судна в порту между выходами в море (судам меньшего размера обычно соответствует меньшая длительность стоянке в порту под выгрузкой – погрузкой, под приемом снабжения и в процессе технического обслуживания между выходами в море  $t_{AR}$ );  $t_{FS}$  – длительность работы судна на промысле в процессе приема рыбы и производства рыбопродукции.

Зависимость длительности кругового рейса  $T_{RG}$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$  показана на функциональной поверхности (Рис. 12).

Зависимость количества круговых рейсов  $n_R$  в течение года от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$ , определяемая по формуле (11), показана на функциональной поверхности (Рис. 13).

Годовая производительность по количеству произведенной промысловым судном рыбопродукции и доставленной в порт назначения

$$Q = n_R \times P_G = n_R \times DW \times \eta_{G1}, \text{ т/год.} \quad (36)$$

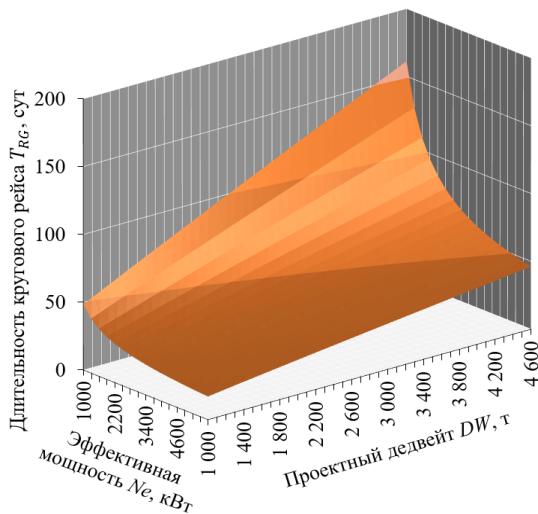


Рис. 12. Зависимость длительности кругового рейса  $T_{RG}$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$

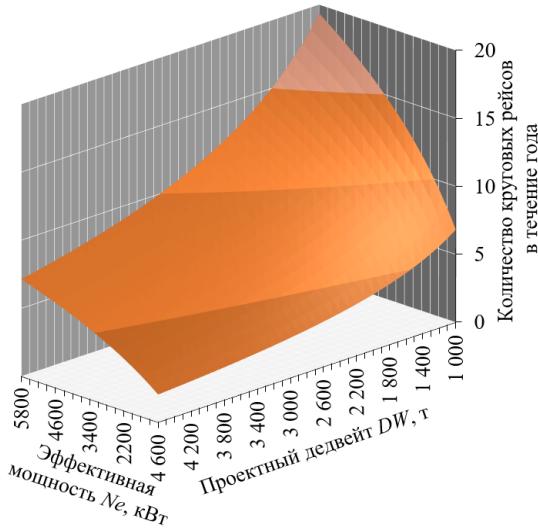


Рис. 13. Зависимость количества круговых рейсов  $n_R$  в течение года от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$

Зависимость годового объема  $Q$  производства рыбопродукции и доставки в порт от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$  показана на функциональной поверхности (Рис. 14).

Совокупный годовой доход при эксплуатации добывающе-перерабатывающего судна можно определить по формуле (13), для которой  $t_m$  – стоимость в расчете на тонну переработанной и доставленной рыбопродукции.

Зависимость совокупного годового дохода  $I$  морского стального промыслового судна от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$  показана на функциональной поверхности (Рис. 15).

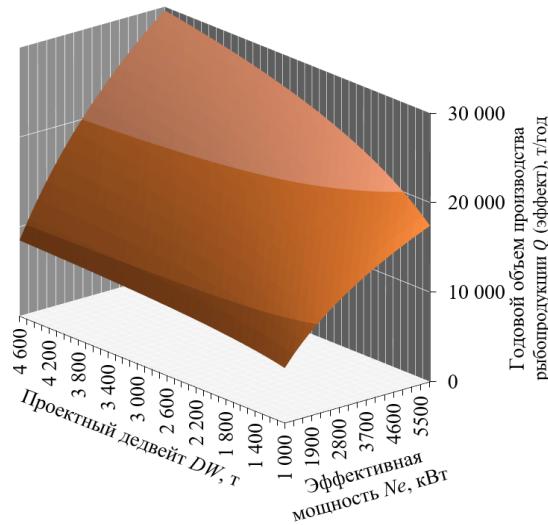


Рис. 14. Зависимость годового объема  $Q$  производства рыбопродукции и доставки в порт от характеристики размера судна (дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$

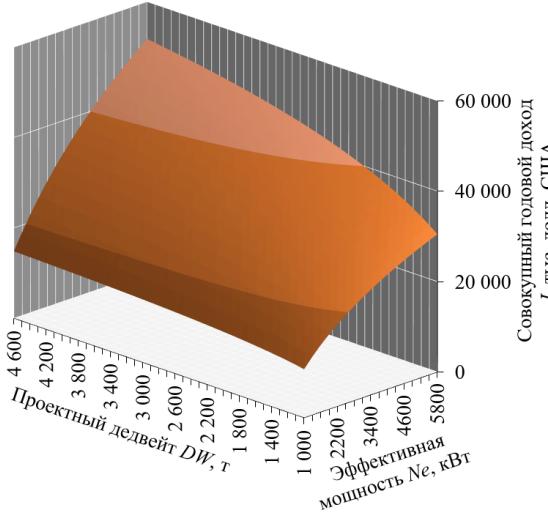


Рис. 15. Зависимость совокупного годового дохода  $I$  морского стального промыслового судна от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$

Годовые затраты на покупку квоты  $C_{RQ}$  (оплата за использование водных биологических ресурсов), также как другие слагаемые годовых эксплуатационных затрат, связанные с объемом добывчи рыбы ( $Q/r$ ), в частности, затраты на обновление изношенных орудий лова  $C_{INST}$ , на приобретение тары, сепарации и технологических материалов  $C_{MS}$  в сумме равны

$$C_{RQ} + C_{INST} + C_{MS} = (0,05 \div 0,35) \times Q/r, \text{ тыс. долл. США}, \quad (37)$$

где  $r$  – отношение массы переработанной рыбопродукции к массе добываемой рыбы (для обезглавленной и потрошенной рыбы равно около 50 %,  $r \approx 0,5$ , при производстве сырой рыбы равно 100 %:  $r = 1,0$ ). Годовые расходы на топливо и моторное масло для промыслового судна равны

$$C_{FL} = n_R \times ((t_R + t_M + t_{FS}) \times q_1 + t_{AR} \times q_2) \times c_{FL}^*, \text{ тыс. долл. США}. \quad (38)$$

Характерные значения стоимости применяемого на промысловых судах моторного дизельного топлива  $c_{FL}^*$  приведены на географической Схеме (Рис. 16, <https://shipandbunker.com/prices#MGO>), стоимость применяемого моторного дизельного топлива приближенно равна:  $c_{FL}^* = 0,75 \div 0,84 \approx 0,80$ , тыс. долл. США/т.

Затраты на снабжение в базовой модели морского стального промыслового судна можно найти по формуле (20). При подстановке значений в формулу (32) годовые эксплуатационные расходы  $C$  для морского стального промыслового судна можно на начальных стадиях определения проектных характеристик найти как

$$\begin{aligned} C = & 1,40 \times n_{CR} \times c_{CR} + C_{RQ} + C_{INST} + C_{MS} + C_{FL} + \\ & + C_{SP} + 0,02 \times RC + 0,02 \times I, \text{ тыс. долл. США,} \end{aligned} \quad (39)$$

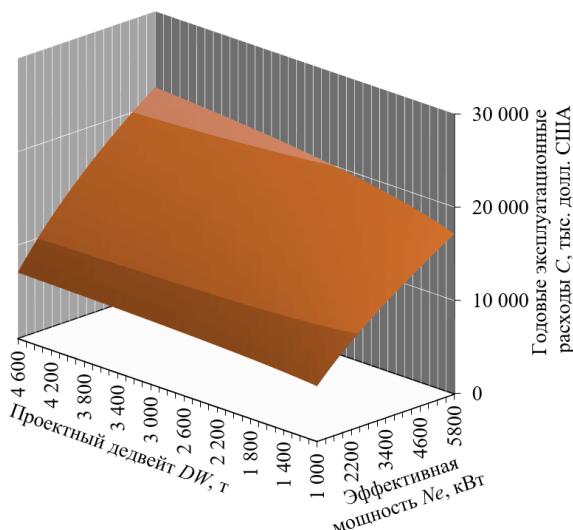


Рис. 17. Зависимость годовых эксплуатационных затрат  $C$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$

Критерий в форме минимизируемых удельных приведенных затрат – в расчете на единицу показателя эффекта ( $PW/Q$ ), найденный по формуле (26) показан на графике поверхности (Рис. 19).

### Заключение

Исходные (базовые) экономические модели морских судов (транспортного и промыслового – добывающе–перерабатывающего) в своих последовательностях включают математические зависимости для определения характеристик судна: размера (водоизмещения, проектного дедвейта и др.), эффективной мощности и эксплуатационной скорости, элементов кругового рейса, слагаемых и суммы годовых эксплуатационных затрат, показателя эффекта (годовой провозоспособности и годового объема выловленной и произведенной рыбопродукции), показателей приведенных затрат, удельных приведенных затрат, внутренней нормы прибыли или иных связанных показателей эффективности.



Рис. 16. Стоимость применяемого моторного дизельного топлива (MGO) приближенно составляет

Зависимость годовых эксплуатационных затрат  $C$  от характеристики размера промыслового судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$  показана на функциональной поверхности (Рис. 17).

Критерий эффективности промыслового судна в форме минимизируемых приведённых затрат  $PW$  (25) показан в форме целевой функции на функциональной поверхности (Рис. 18).

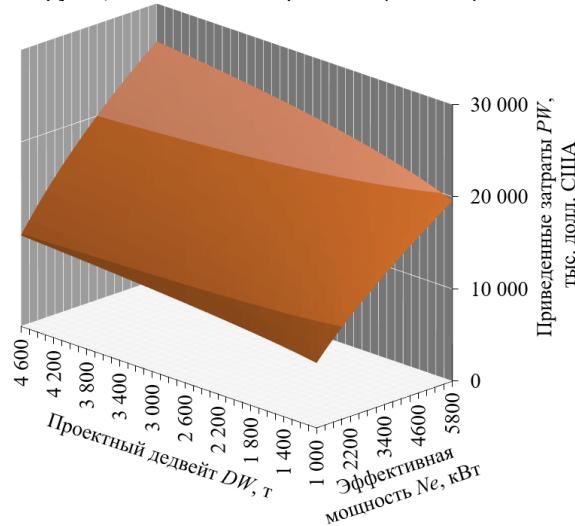


Рис. 18. Зависимость приведенных затрат  $PW$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$

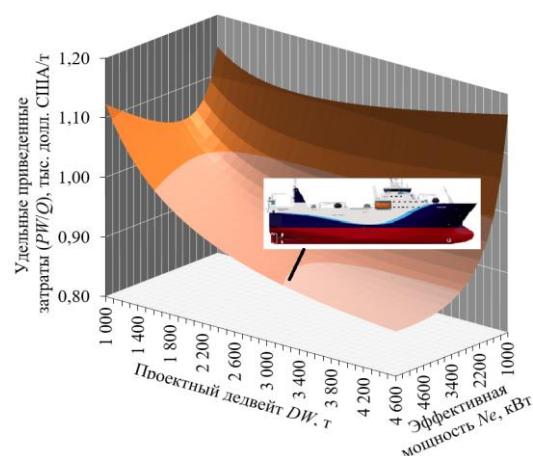


Рис. 19. Зависимость удельных приведенных затрат  $(PW/Q)$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$

Использование исходных (базовых) моделей в составе целевых функций для определения оптимальных по выбранным критериям значений характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования судна может осуществляться в любой алгоритмической среде, например, в электронных таблицах Microsoft Excel.

Исходные данные (проектные ограничения) определяются в рамках системного подхода как характеристики общей системы, к которой судно относится как подсистема.

Поскольку используемые при определении элементов проектируемого судна, включая его размерения и соотношения размерений, методы, основанные на оценке мореходных качеств изотропны по отношению к задаче нахождения

оптимальных характеристик судна, в частности, его размеров судна, проектного дедвейта, водоизмещения, вместимости и пр., т.к. суда разных размеров обладают соответствующими мореходными качествами и эти качества не служат критериями определения размера судна, а напротив, размер выступает исходным данным (проектным ограничением) при нахождении элементов судна, то использование исходных (базовых) моделей в составе целевых функций входит в состав системных (научных) методов для определения оптимальных характеристик на начальных стадиях проектирования судна и для нахождения исходных данных (проектных ограничений) при определении элементов судна (размерений, их соотношений и пр.).

### Литература

1. Ашик В.В. Проектирование судов: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1985. 320 с., ил.
2. Бронников А.В Проектирование судов: учебник. 2-е изд. перераб. и доп. Л. : Судостроение, 1991. 320 с.
3. Войлошников М.В. Морские ресурсы и техника: эффективность, стоимость, оптимальность. Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2002. 586 с.
4. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т. 1: Описание системы «Корабль». Т. 2: Анализ синтез системы «Корабль». СПб. : Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014.
5. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании морских судов. 2-е изд. перераб. и доп. Л. : Судостроение, 1981.
6. Огай С.А., Войлошников М.В. Многоуровневый системный подход при определении оптимальных проектных характеристик судна ледового плавания // Морские интеллектуальные технологии: науч. журн. 2017. № 3 (37), т. 2. 205 с. С. 318–326.
7. Огай С.А., Войлошников М.В. Оптимизация проектных характеристик судна в составе комплекса судоходной компании // Морские интеллектуальные технологии: науч. журн. 2011. № 4 (14).
8. Огай С.А., Войлошников М.В. Проектная нагрузка и водоизмещение многоцелевого судна ледового плавания // Морские интеллектуальные технологии: науч. журн. 2015. № 3 (29), т. 1. С. 12–27.
9. Огай С.А. Нахождение функции полезности в составе критерия оптимальности при определении проектных характеристик многоцелевого судна ледового плавания // Морские интеллектуальные технологии: науч. журн. 2017. № 3 (37), т. 2. С. 35–45.
10. Огай С.А. Целевая функция для оптимизации проектных характеристик многоцелевого судна ледового плавания // Морские интеллектуальные технологии: науч. журн. 2016. № 3 (33), т. 1. С. 15–24.
11. Пашин В.М. Оптимизация судов. Л. : Судостроение, 1983.
12. Экономическое обоснование проектных решений: пособие для конструктора-судостроителя: справ. / Н.И. Теретников, Н.П. Любушин, В.А. Бирюля, А.Ф. Иконников; под общ. ред. Н.П. Любушкина. Л. : Судостроение, 1990.

### References

1. Ashik V.V. Proektirovanie sudov: uchebnik [Ship Design: textbook]. 2-e izd., pererab. i dop. L.: Sudostroenie, 1985. 320 s., il.
2. Bronnikov A.V Proektirovanie sudov: uchebnik [Ship Design: textbook]. 2-e izd. pererab. i dop. L. : Sudostroenie, 1991. 320 s.
3. Vojloshnikov M.V. Morskie resursy i tekhnika: effektivnost', stoimost', optimal'nost' [Marine Resources and Facilities: Efficiency, Costs, Optimality]. Vladivostok : Izd-vo DVGTU, 2002. 586 s.
4. Gajkovich, A.I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchih korablej i sudov [Design Theory for Water Displacing Ships and Vessels]: v 2 t. T. 1: Opisanie sistemy «Korabl» [Description of the "Ship" System]. T. 2: Analiz i sintez sistemy «Korabl» [Analysis and Synthesis of the "Ship" System]. SPb. : Izd-vo NIC MORINTEKH, 2014.
5. Kraev V.I. Ekonomicheskie obosnovaniya pri proektirovaniyu morskikh sudov [Economic Evaluation when Designing Ocean Ships]. 2-e izd. pererab. i dop. L. : Sudostroenie, 1981.
6. Ogaj S.A., Vojloshnikov M.V. Mnogourovnevij sistemnyj podhod pri opredelenii optimal'nyh proekt-nyh harakteristik sudna ledovogo plavaniya [Multilevel System Approach when Defining Optimum Ice-going Ship Design Data] // Morskie intellektual'nye tekhnologii: nauch. zhurn. 2017. № 3 (37), t. 2. 205 s. S. 318–326.
7. Ogaj S.A., Vojloshnikov M.V. Optimizaciya proektnyh harakteristik sudna v sostave kompleksa sudohod-noj kompanii [Optimizaion of Design Date for a Ship Incorporated into a Shipping Company's Fleet] // Morskie intellektual'nye tekhnologii: nauch. zhurn. 2011. № 4 (14).
8. Ogaj S.A., Vojloshnikov M.V. Proektnaya nagruzka i vodoizmeshchenie mnogocelevogo sudna ledovogo plavaniya [Design Condition and Displacement of a Multi-purpose Ice-going Ship] // Morskie intellektual'nye tekhnologii: nauch. zhurn. 2015. № 3 (29), t. 1. S. 12–27.
9. Ogaj S.A. Nahozhdenie funkciyu poleznosti v sostave kriteriya optimal'nosti pri opredelenii proekt-nyh harakteristik mnogocelevogo sudna ledovogo plavaniya [Obtaining Utility Function as a Part of Optimization Criterion when

- Defining a Multi-purpose Ice-going Ship Design Data] // Morskie intellektual'nye tekhnologii: nauch. zhurn. 2017. № 3 (37), t. 2. S. 35–45.
10. Ogaj S.A. Celevaya funkciya dlya optimizacii proektnykh harakteristik mnogocelevogo sudna ledovogo plavaniya [Goal Function for Optimization of a Multi-purpose Ice-going Ship Design Data] // Morskie intellektual'nye tekhnologii: nauch. zhurn. 2016. № 3 (33), t. 1. S. 15–24.
11. Pashin V.M. Optimizaciya sudov [Ships' Streamlining]. L. Sudostroenie, 1983.
12. Ekonomicheskoe obosnovanie proektnykh reshenij: posobie dlya konstruktora-sudostroitelya: sprav [Economic Evaluation for Design Choice: Guide for Ship Constructor: reference book]. / N.I. Teretnikov, N.P. Lyubushin, V.A. Birulya, A.F. Ikonnikov; pod obshch. red. N.P. Lyubushina. L. Sudostroenie, 1990.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Алексей Сергеевич Огай**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50-а; e-mail: ogay\_a@msun.ru

**Михаил Владиленович Войлошников**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50-а; e-mail: michael.vladlen@gmail.com

**Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, профессор Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50-а; e-mail: ogay@msun.ru

**Alexey S. Ogai**, Ph.D. (Eng), Associate professor, Director of Department of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50-a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russian Federation; e-mail: ogay\_a@msun.ru

**Michael V. Voyloshnikov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief research scientist of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50-a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russian Federation; e-mail: michael.vladlen@gmail.com

**Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Professor of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50-a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russian Federation; e-mail: ogay@msun.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.02.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 16.03.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 24.03.2022.

**Научная статья**

УДК 656.052:656.052.4:519.876.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.031>

## Прогнозирование изменения курса судна в процессе маневрирования

Ю.И. Юдин<sup>1</sup> [udinui@rambler.ru](mailto:udinui@rambler.ru), С.И. Позняков<sup>2</sup> [serpoz@mail.ru](mailto:serpoz@mail.ru)

<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск

<sup>2</sup>Мурманский транспортный филиал ПАО «Норильский никель»

**Аннотация.** В начальной стадии выполнения любого маневра необходимо прогнозирование движения судна в текущих условиях плавания до момента совершения судоводителем через средства управления судном определенных управляющих воздействий. Как правило, такое прогнозирование основывается на практическом опыте судоводителя, осуществляющего управление или дающего команды на выполнение управляющего воздействия. В данном случае не исключена ошибка, вероятность которой существенно возрастает, если условия, в которых выполняется маневр не адекватны практическому опыту судоводителя. В лучшем случае, оценку правильности выполняемых действий он осуществляет последовательно, методом проб и ошибок. Относительная скоротечность выполнения любой сложной операции по маневрированию судна не представляет судоводителю достаточно времени для анализа степени и характера влияния множества факторов на поведение судна. В этих условиях целесообразно использовать возможность бортового компьютера. Для этого необходимо, прежде всего, иметь в памяти компьютера базовую математическую модель судна (возможно несколько моделей разного вида), программу идентификации математической модели с привязкой к текущим условиям плавания и состоянию загрузки судна на данный момент, а также алгоритм и разработанные на его основе программные средства для выполнения прогноза движения судна. Решению этих задач посвящена настоящая статья.

**Ключевые слова:** принцип максимума, математическая модель судна, прогнозирование движения судна.

**Для цитирования:** Юдин Ю.И., Позняков С.И. Прогнозирование изменения курса судна в процессе маневрирования, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 238—244.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.031>

## Forecasting variable course in the process of maneuvering

Yuri I. Yudin<sup>1</sup> [udinui@rambler.ru](mailto:udinui@rambler.ru), Sergey I. Poznjakov<sup>2</sup> [serpoz@mail.ru](mailto:serpoz@mail.ru)

<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk

<sup>2</sup>Murmansk transport branch of Norilsk Nickel

**Abstract.** At the initial stage of performing any maneuver, it is necessary to predict the movement of the vessel in the current sailing conditions until the moment the navigator makes certain control actions through the means of control of the vessel. As a rule, such forecasting is based on the practical experience of the navigator performing control or giving the command to perform control action. In this case, an error is not excluded, the probability of which increases significantly if the conditions in which the maneuver is performed are not adequate to the navigator's practical experience. At best, he evaluates the correctness of the actions performed sequentially, by trial and error. The relative transience of any complex ship maneuvering operation does not provide the navigator with enough time to analyze the degree and nature of the influence of many factors on the ship's behavior. In these conditions, it is advisable to use the capability of the on-board computer. To do this, it is necessary, first of all, to have in the computer memory the basic mathematical model of the ship (several models of different types are possible), the program for identifying the mathematical model with reference to the current sailing conditions and the state of loading of the ship at the moment, as well as an algorithm and software developed on its basis. means for forecasting the movement of the vessel. This article is devoted to solving these problems.

**Key words:** maximum principle, mathematical model of the ship, forecasting the movement of the ship.

**For citation:** Yuri I. Yudin, Sergey I. Poznjakov. Forecasting variable course in the process of maneuvering, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 238—244.

### Введение

Целым рядом исследователей [1], [2], [3], [12], [14], [17] и др., разработаны несколько видов математических моделей, в различной степени отвечающих основному требованию их адекватности натурным судам с учетом того, что обязательным условием при их разработке является идентификация по данным натурных экспериментов. Известно, что степень адекватности математической модели определенного вида существенно зависит

как от качества имевшихся в распоряжении исследователей результатов натурных и модельных экспериментов, так и от возможности качественного анализа и интерпретации этих результатов.

Выбор вида математической модели для использования ее в целях прогнозирования движения судна определяется степенью адекватности параметров его движения в процессе моделирования, значениям параметров движения судна при выполнении им стандартных маневров,

наиболее известными из которых являются, циркуляция и маневра zig-zag [18, 19].

Для выполнения параметрической идентификации математической модели выбран способ с использованием принципа максимума, разработанного академиком Л.С. Понтрягиным [5]. Метод использования принципа максимума для идентификации математической модели судна описан в работе автора [11].

В нашем случае идентификация математической модели важна не сама по себе, а для того чтобы использовать идентифицированную модель при прогнозировании движения судна в процессе выполнения им заданного маневрирования, в частности, циркуляции.

### Выбор вида математической модели

Как сказано выше, одним из стандартных маневров судна является циркуляция, результаты натурных наблюдений которой позволяют выполнить параметрическую идентификацию выбранного для исследований вида математической модели. Обычно при проведении натурных испытаний по циркуляции фиксируется курс судна по времени  $\psi(t)$ , а угловая скорость  $\omega(t)$  рассчитывается делением приращения курса на приращение времени  $\Delta\psi(t)/\Delta t$ . Такой способ определения значений угловой скорости из-за малости приращений приводит к неприемлемым погрешностям и, как следствие, не может быть использован для прогнозирования изменений курса судна. Поэтому для прогнозирования изменения курса судна на циркуляции используем простейшее дифференциальное уравнение с минимальным количеством параметров, которые будем идентифицировать с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина. В этом смысле, решению поставленной задачи в большей степени отвечает упрощённая математическая модель Номото, которая имеет лишь два параметра, один из которых характеризует динамические свойства корпуса судна ( $\tau$ ), другой – эффективность его руля ( $K_\alpha$ ):

$$\tau\dot{\omega} + \omega = K_\alpha\alpha_r \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость судна;  $\alpha_r$  – угол перекладки руля.

На первый взгляд, это достаточно простое уравнение, но, как известно, оно позволяет решать ряд практических задач, связанных с оценкой управляемости судна в различных условиях [10], [15], [16].

### Идентификация модели

Решение поставленной нами задачи с использованием принципа максимума сводится к минимизации функционала, присущего дифференциальной аппроксимации:

$$F(\tau, K_\alpha) = \inf \left[ \int (\tau\dot{\omega} + \omega - K_\alpha\alpha_r)^2 dt \right] \quad (2)$$

Перейдя от интегрирования к суммированию, продифференцируем в поисках минимума функцию  $F(\tau, K_\alpha)$  по параметрам  $\tau$  и  $K_\alpha$ , приравняв затем производные нулю. В результате получим систему двух уравнений относительно идентифицируемых параметров  $\tau$  и  $K_\alpha$ :

$$\begin{aligned} \tau \sum (\dot{\omega})^2 - K_\alpha \sum (\alpha_r \dot{\omega}) &= \sum (\omega \dot{\omega}) \\ \tau \sum (\alpha_r \dot{\omega})^2 - K_\alpha \sum \alpha_r^2 &= \sum (\omega \alpha_r) \end{aligned} \quad (3)$$

Решение этой системы элементарно. Для реализации решения системы уравнений (3) используем данные натурных испытаний по циркуляции рыболовного судна "Борис Зайцев" при перекладке руля на правый борт  $\alpha_r = 10^\circ$  линейно по времени за 5 с, при начальной скорости  $v_0 = 3$  уз. Основные размерные характеристики указанного судна представлены в таблице 1.

Таблица 1  
Основные размерные характеристики РС «Борис Зайцев»

Наименования размерных характеристик	Значения размерных характеристик
Длина между перпендикулярами $L_{pp}$ , м	34.8
Ширина В, м	11.0
Осадка носом $d_n$ , м	4.92
Осадка кормой $d_a$ , м	5.47
Коэффициент общей полноты $C_b$	0.643
Диаметр винта D, м	3.1
Обороты винта n, 1/c	3.33
Площадь пера руля $F_r$ , м <sup>2</sup>	5.28
Высота пера руля $h_r$ , м	3.2

Результаты указанных испытаний приведены в таблице 2 в виде данных по изменению курса  $\psi_{ev}(t)$ , так как именно курс фиксировался в процессе выполнения циркуляции.

Таблица 2  
Изменения курса судна  $\psi_{ev}(t)$  в процессе выполнения натурной циркуляции.

t, с	0	60	120	180	240	300
$\psi_{ev}$ , °	197	203	231	285	355	058
t, с	360	420	480	540	600	660
$\psi_{ev}$ , °	113	171	218	266	316	008

Чтобы использовать эти данные при решении системы (3), приведенные в таблице 2 данные аппроксимированы полиномом четвертой степени в программной среде Mathcad. Аналитическое представление аппроксимации имеет следующий вид:

$$\psi_{ev}(t) = 197.513 - 0.303t + 6.48E - 3t^2 - 1.26E - 5t^3 + 8.07E - 9t^4 \quad (4)$$

Данное представление дает возможность аналитически найти первую производную курса по времени – угловую скорость судна  $\omega_{ev}(t) = d\psi_{ev}(t)/dt$ , и угловое ускорение  $d\omega_{ev}(t)/dt$ . Все эти переменные используются для решения системы уравнений (3).

На рисунках 1, 2 показаны изменения значений, указанных выше переменных в процессе выполнения натурной циркуляции.

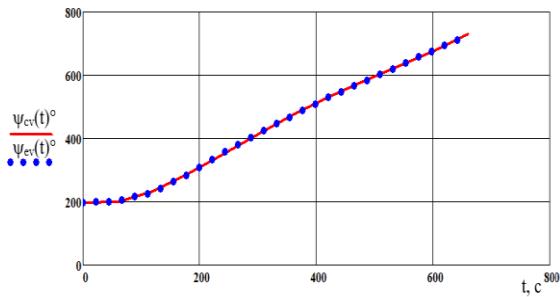


Рис. 1. Изменение курса во времени  $\psi_{ev}(t)$  в процессе выполнения циркуляции и график аппроксимации зависимости  $\psi_{ev}(t)$ .

$$\begin{aligned}\sum(\dot{\omega})^2 &= 0.01254; -\sum(\alpha_r \dot{\omega}) = 12.977; -\sum(\omega \dot{\alpha}_r) = 0.523; -\sum \alpha_r^2 = 6.52182 \times 10^4; \\ \sum(\omega \alpha_r) &= 5.32774 \times 10^3; -\sum(\dot{\omega} \alpha_r)^2 = 210.398\end{aligned}\quad (5)$$

Приведенные суммы позволяют непосредственно найти искомые параметры модели, что приводит к следующим значениям:  $\tau = 53.973$ ;  $K_\alpha = 0.09243$ .

С использованием этих значений было решено дифференциальное уравнение (1). На рисунке 3 приведены в графической форме результаты этого решения  $\psi_{cv}(t)$ , здесь же представлена зависимость курса от времени, полученная в натурных условиях  $\psi_{ev}(t)$ .

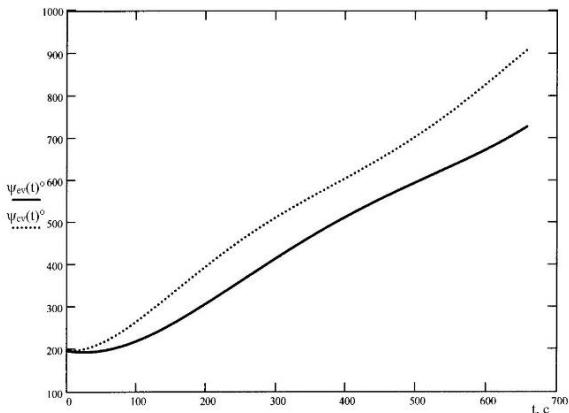


Рис. 3. Сравнительное графическое представление изменения курса судна (кривая  $\psi_{ev}(t)$  – опытная, кривая  $\psi_{cv}(t)$  – расчетная).

Подсчитано также среднее квадратическое отклонение (СКО)  $\psi_{cv}(t)$  от  $\psi_{ev}(t)$  –  $\sigma_\psi = 100.6^\circ$ . Это отклонение для нас неприемлемо. На графиках (рисунок 3) видно, каким образом возникает такое отклонение. Вероятнее всего, это следствие упрощенного вида математической модели судна (1).

Расхождение между опытным и расчетным значениями курсов можно уменьшить, произведя вариацию идентифицированных параметров модели. Правда, у такой вариации отсутствует механизм предвидения. Тем не менее, очевидно, что параметр  $K_\alpha$  существенно сильнее влияет на СКО курсов. Поэтому подбором находим значение  $K_\alpha$ , которое сводит  $\sigma_\psi$  к минимуму. Затем варьируем параметр  $\tau$  и снова достигаем минимума. Итак, при  $\tau = 51$  (ранее определенное значение 53.973) и  $K_\alpha =$

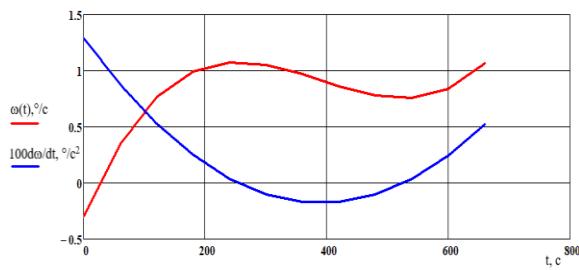


Рис. 2. Изменение угловой скорости  $\omega_{ev}(t)[\omega(t)]$  и углового ускорения  $100d\omega_{ev}(t)/dt[d\omega/dt]$  в процессе выполнения циркуляции.

Далее рассчитываем значения сумм, входящих в уравнение (3), их значения будут равны:

0.0855 (0.09243) получаем относительный минимум среднеквадратического отклонения  $\sigma_\psi = 46.7^\circ$ . Рассчитанное при этих значениях изменение курса представлено на рисунке 4.

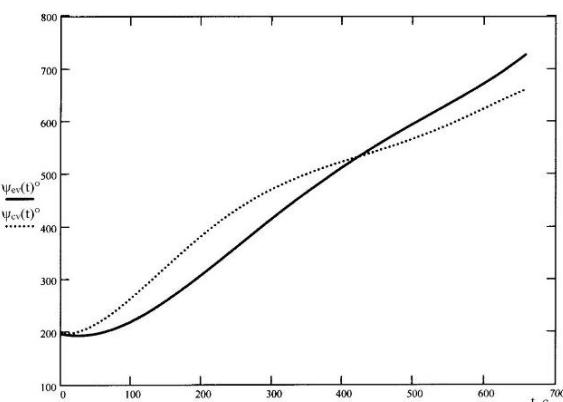


Рис. 4. Сравнительное графическое представление курса судна после вариации параметров модели (кривая  $\psi_{ev}(t)$  – опытная, кривая  $\psi_{cv}(t)$  – расчетная)

Используем найденные значения параметров  $\tau$  и  $K_\alpha$  как предварительные, и перейдем к постановке и решению задачи в терминах принципа максимума Л.С. Понтрягина. Если бы в процессе выполнения циркуляции измерялись и курс  $\psi_{ev}(t)$ , и угловая скорость судна  $\omega_{ev}(t)$ , то потребовалось бы минимизировать функционал:

$$\min \left\{ \int [\alpha_1 (\omega_{cv} - \omega_{ev})^2 + \alpha_2 (\psi_{cv} - \psi_{ev})^2 dt] \right\} = \min \left\{ \int f_0 dt \right\} \quad (6)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – параметры функции гамильтониана Н [11].

Так как в рассматриваемом натурном эксперименте измерялся только курс судна  $\psi_{ev}(t)$ , то функционал упрощается и мы приходим к выражению:

$$\min \left\{ \int (\psi_{cv} - \psi_{ev})^2 dt \right\} \quad (7)$$

Таким образом система уравнений и гамильтониан Н, используемые для решения задачи параметрической идентификации выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
 d\omega_{cv}/dt &= (K_\alpha \alpha_r - \omega_{cv})/\tau \\
 d\psi_{cv}/dt &= \omega_{cv} \\
 dp_\omega/dt &= p_\omega/\tau - p_\psi \\
 dp_\psi/dt &= 2(\psi_{cv} - \psi_{ev}) \\
 H &= -[(\psi_{cv} - \psi_{ev})^2] + p_\omega(K_\alpha \alpha_r - \omega_{cv})/\tau + p_\psi \omega_{cv} \quad (8)
 \end{aligned}$$

Двухточечные граничные условия решения системы уравнений (8) будут следующими:

$$\begin{aligned}
 \omega_{cv}(0) &= 0 \\
 \psi_{cv}(0) &= \psi_{cv0} \\
 p_\psi(t_f) + 2\Lambda_1[\psi_{cv}(t_f) - \psi_{ev}(t_f)] &= 0 \\
 -[\psi_{cv}(t_f) - \psi_{ev}(t_f)]^2 + \{p_\omega(t_f)[K_\alpha \alpha_r(t_f) - \omega_{cv}(t_f)]\}/\tau + p_\psi(t_f)\omega_{cv}(t_f) &= 0 \quad (9)
 \end{aligned}$$

Краевая задача решалась в программной среде Mathcad. Формулировка решения системы дифференциальных уравнений (8) представлена на рисунке 5.

```

t = 53.972859
Kαv = 0.09243
m := 660      t := 1 .. m      del0 := 10      del(t) := 

$$\begin{cases} \frac{del0}{5} \cdot t & \text{if } t \leq 5 \\ del0 & \text{if } t > 5 \end{cases}$$

tv := 32.37      Kαv := 0.0855
y :=  $\begin{pmatrix} -0.3 \\ 197.5 \\ 1 \\ -2.5 \end{pmatrix}$ 
D(t,y) :=  $\begin{pmatrix} (K_\alpha v \cdot del(t) - y_0) \\ tv \\ y_0 \\ (-y)_3 + \frac{1}{tv} \cdot y_2 \\ 2 \cdot (y_1 - fit\psi(t)) \end{pmatrix}$ 
Z := rkfixed(y, 0, m, m, D) = too large to display
  
```

Рис. 5. Текст программы решения задачи на максимум гамильтониана  $H$  в программной среде MathCad.

Через вектор четвертого порядка  $y$  обозначена совокупность искомых решений системы:  $y = \{\omega, \psi, p_\omega, p_\psi\}$ . Программный пакет оперировал векторами-столбцами, для экономии места он записан в виде вектора-строки. Начальное значение этого вектора  $y = \{-0.3; 197.5; 0; 0\}$ . При этом за начальные значения идентифицируемых параметров взяты те значения, которые были найдены на первом этапе расчетов:  $tv = 53.972859$ ,  $K_\alpha v = 0.09243$  ( $v$  – символ варьирования). В интерактивном режиме, при изменении начальных значений  $p_\omega$  и  $p_\psi$ , было определено их незначительное влияние на величину гамильтониана  $H$  в конечной точке решения  $t = t_f$ . Кроме того, варьировались идентифицируемые параметры  $tv$ ,  $K_\alpha v$ , из которых большее влияние на  $H$  оказывает параметр  $tv$ . При значении параметра  $tv = 32.37$  достигается относительный максимум гамильтониана  $H$ , который почти равен нулю в конечной точке  $t = t_f$ . Дополнительно, малыми изменениями параметра  $K_\alpha v$ , а также начальных значений  $p_\omega$  и  $p_\psi$  было получено еще большее приближение к нулю значения максимума гамильтониана в конечной точке решения  $t_f = 660$  с, а

именно,  $H = 5.7 \times 10^{-3}$ . На данном этапе в качестве конечных значений параметров были приняты следующие значения:  $\tau = 32.37$  и  $K_\alpha = 0.0855$ . При этих значениях  $\tau$  и  $K_\alpha$  СКО расчетного  $\psi_{cv}(t)$  и экспериментального  $\psi_{ev}(t)$  изменения курса судна  $\sigma_\psi = 13.9^\circ$ . Что существенно меньше по сравнению с ранее полученным значением  $\sigma_\psi = 46.7^\circ$ .

Результаты решения в виде графиков изменения курса судна  $\psi_{cv}(t)$  и его угловой скорости  $\omega_{cv}(t)$  показаны на рисунке 6 в сравнении с их изменениями  $\psi_{ev}(t)$ ,  $\omega_{ev}(t)$ , полученными в процессе проведения натурного эксперимента.

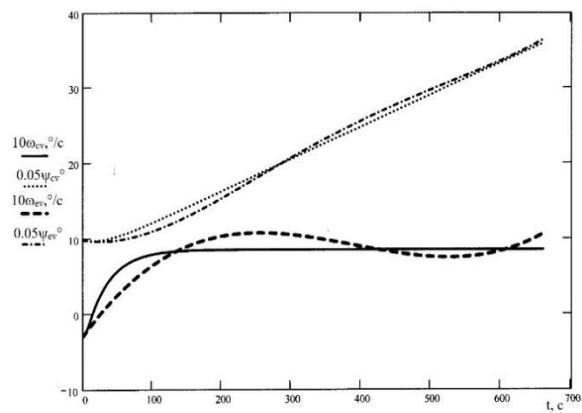


Рис. 6. Сравнительное поведение расчетных  $\psi_{cv}(t)$  и экспериментальных значений  $\psi_{ev}(t)$  курса судна и его угловой скорости  $\omega_{cv}(t)$ ,  $\omega_{ev}(t)$ .

При этом на рисунке 7 показаны изменения в процессе расчетов сопряженных переменных  $p_\omega(t)$ ,  $p_\psi(t)$  и гамильтониана  $H(t)$ .

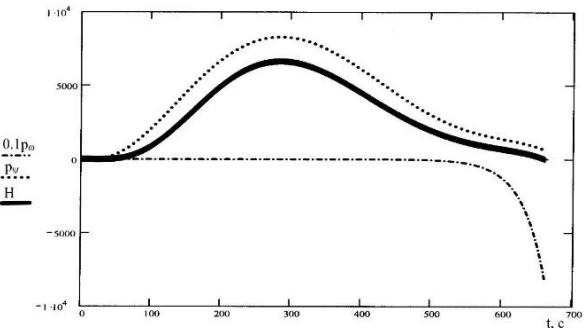


Рис. 7. Изменение величины сопряженных переменных  $p_\omega(t)$ ,  $p_\psi(t)$  и гамильтониана  $H(t)$ .

На рисунке 6 хорошо видны вполне приемлемые совпадения данных процессов изменения экспериментальных  $\psi_{ev}(t)$ ,  $\omega_{ev}(t)$  и расчетных  $\psi_{cv}(t)$ ,  $\omega_{cv}(t)$  значений курса судна и его угловой скорости.

Кроме того, для наглядности процесса идентификации, на рисунке 8 представлено изменение во времени гамильтониана  $H(t)$  и трех его составляющих  $H_1(t)$ ,  $H_2(t)$  и  $H_3(t)$ :

$$\begin{aligned}
 H_1 &= -(\psi_{cv} - \psi_{ev})^2; \quad H_2 = p_\omega(K_\alpha \alpha_r - \omega_{cv})/\tau; \quad H_3 = p_\psi \omega_{cv} \quad (10)
 \end{aligned}$$

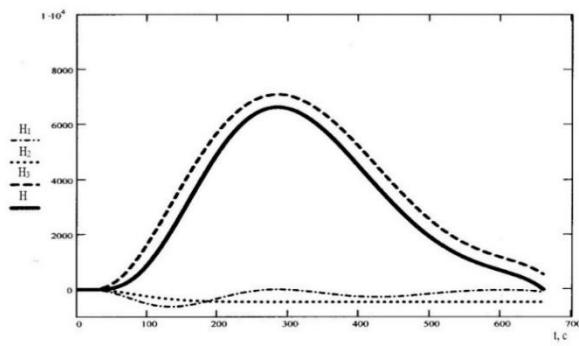


Рис. 8. Изменение величины гамильтониана  $H(t)$  и его трех составляющих  $H_1(t)$ ,  $H_2(t)$  и  $H_3(t)$ .

Из рисунка 8 видно, что главной составляющей гамильтониана  $H$  является третье слагаемое  $H_3$ , зависящее от угловой скорости  $\omega$  и сопряженной к курсу переменной  $\psi_{cv}$ . Характер ее изменения определяется дифференциальным уравнением  $d\psi_{cv}/dt = 2[\psi_{cv}(t) - \psi_{ev}(t)]$ , и, следовательно, зависит от близости курсов расчетного  $\psi_{cv}$  и экспериментального  $\psi_{ev}$ .

Обратим внимание на тот факт, что между значениями параметров, найденных как базовые и идентифицированных с использованием принципа максимума, разница существенна (для  $\tau$  это 53.97 и 32.37, для  $K_\alpha$  – 0.09243 и 0.0855). Тем не менее именно найденные в первом случае значения параметров позволили нам приступить к идентификации с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина и облегчить поиск решения вариацией параметров математической модели  $\tau$  и  $K_\alpha$ .

### Прогнозирование изменения курса

На последнем этапе исследования, выполним прогнозирование процесса изменения курса с помощью идентифицированной математической модели. Для этого взяты первые 330 точек процесса, т.е. рассмотрено изменение курса судна в процессе циркуляции на временном интервале от 0 до 330 с и по ним с использованием принципа максимума идентифицированы параметры математической модели судна  $\tau$  и  $K_\alpha$ . В результате получены следующие значения параметров математической модели  $\tau = 44.17$  и  $K_\alpha = 0.0855$  с достижением максимума гамильтониана в конечной точке  $H(330) = 0.0096$ . С использованием найденных значений параметры модели выполнен прогноз процесса изменения курса судна для следующего интервала времени циркуляции: от 330 с до 660 с.

Решение выполнено в программной среде Mathcad, а его результаты представлены на рисунке 9, при этом отчет времени на втором этапе циркуляции ведется с нулевого значения, т.е. время  $t = 0$  соответствует 330 секунде всего процесса циркуляции.

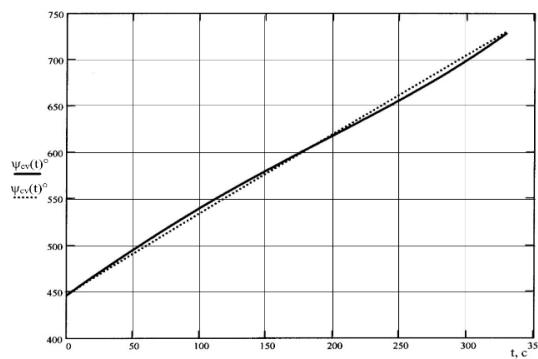


Рис. 9. Результаты прогнозирования изменения курса судна на циркуляции.

За начальные значения угловой скорости и курса взяты их значения, полученные аппроксимацией данных натурного эксперимента на момент времени  $t_0 = 329$  с. Сравнительный анализ графически представленных изменений курса судна, полученного в ходе натурного эксперимента и прогнозируемого курса свидетельствует об удовлетворительной близости их значений, при этом оценка по СКО их отклонения приводит к результату  $\sigma_\psi = 4.35^\circ$ .

### Заключение

Решение задачи прогнозирования изменения курса судна с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина можно считать вполне приемлемым для моделей, имеющих небольшое число параметров – не более трех. Это позволяет рекомендовать использование простейших моделей, но с частым обновлением их параметров во времени.

Исходными, приближенными значениями параметров модели для их стартового использования при прогнозировании на основе принципа максимума являются значения, найденные методом дифференциальной аппроксимации.

Для вариации параметров модели при прогнозировании с использованием принципа максимума необходимо достоверное знание интервалов возможного изменения каждого идентифицируемого параметра. Для установления таких интервалов требуются специальные исследования, связанные с анализом различных теорий, с помощью которых определяются эти параметры.

Число обрабатываемых точек при идентификации должно выбираться на основе определения СКО расчетных значений прогнозируемого параметра и его текущих значений в ходе выполняемого маневра. Когда СКО достигает приемлемого для нас значения за счет увеличения числа обрабатываемых точек, мы останавливаемся на этом количестве данных.

Временной интервал прогнозируемого изменения интересующего нас параметра движения судна в процессе выполнения маневра не должен по превышать временного промежутка обработки, результаты прогнозирования следует обновлять как можно чаще.

## Литература

1. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов. М.: Транспорт, 1967, 255 с.
2. Вьюгов В.В. Управляемость водоизмещающих речных судов. Новосибирск, НГАВТ, 1999. 261 с.
3. Гофман А.Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. Л.: Судостроение, 1988. 360 с.
4. Мастушкин Ю.М. Управляемость промысловых судов. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1981. 232 с.
5. Моисеев Н.Н. Численные методы синтеза оптимальных управлений. М.: Наука, 1979, с.443.
6. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. Л.: Судостроение. 1983, 282 с.
7. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. Л.: Судостроение. 1976. 480 с.
8. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 432 с.
9. Юдин Ю.И., Р.Г. Степахно. Идентификация модели судна – важнейший элемент управления безопасностью мореплавания. Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN, 2003: Материалы III междунар. конф. – Калининград, 2003.
10. Юдин Ю.И., Пашенцев С.В., Степахно Р.Г. Идентификации математической модели судна: монография. М.: МОРКНИГА, 2015. 157 с.
11. Юдин Ю.И., Пашенцев С.В. Использование принципа максимума для параметрической идентификации математической модели судна. Наука и техника транспорта. 2006. № 2. С. 100–107.
12. Kijima K. On the Maneuvering Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition. K. Kijima, at.al.. SNAJ, Nov. 1990
13. Kijima K. Prediction Method of Ship Maneuverability in Deep and Shallow waters. K. Kijima, at.al.. MARSIM & ICSM, June, 4.7, 1990.
14. Lee T. et.al. On an Empirical Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Modern Ship Hulls. T. Lee, et.al. Proceedings of MARSIM'03, Vol. III, August, 2003.
15. Nomoto K. A New Procedure of Analysing Zig.zag Test. K. Nomoto, K. Kose, Y. Yoshimura. Journal of the Society of Naval Architects of Japan. December 1973.
16. Nomoto K. A review of methods of defining and measuring the manoeuvrability of Ships. K. Nomoto, N. Norrbom. ITTC, Manoeuvrability Committee Report. 1969.
17. Nomoto K. On the steering Qualities of Ship. K. Nomoto, T. Taguchi, S. Hirano. International Shipbuilding Progress. 1957. Vol. 4, № 35. P. 354–370.
18. Студеникин Д.Е., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В., Модина М.А. Динамическое формирование коридора безопасности при планировании маршрута движения судна. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-4 (52). С. 128-131.
19. Yoshimura Y., Nomoto K., Modeling of Maneuvering Behavior of Ships with Propeller Idling, Boosting and Reversing. Yoshimura Y., K. Nomoto. JSNAJ, Vol.144, 1978.

## References

1. Basin A.M. Khodkost' i upravlyayemost' sudov [Propulsion and controllability of ships]. M.: Transport, 1967, 255 s.
2. V'yugov V.V. Upravlyayemost' vodoizmeshchayushchikh rechnykh sudov [Controllability of displacement river vessels]. Novosibirsk, NGAVT, 1999. 261 s.
3. Gofman A.D. Dvizhitel'no-rulevoy kompleks i manevrirovaniye sudna [Propulsion-steering complex and vessel maneuvering]. Spravochnik. L.: Sudostroyeniye, 1988. 360 s.
4. Mastushkin YU.M. Upravlyayemost' promyslovykh sudov [Handling of fishing vessels]. M.: Legkaya i pishchevaya promyshlennost'. 1981. 232 s.
5. Moiseyev N.N. Chislennye metody sinteza optimal'nykh upravleniy [Numerical methods for the synthesis of optimal controls]. M.: Nauka, 1979, s.443.
6. Pershits R.YA. Upravlyayemost' i upravleniye sudnom [Ship control and management]. L.: Sudostroyeniye. 1983, 282 s.
7. Sobolev G.V. Upravlyayemost' korablya i avtomatizatsiya sudovozhdeniya [Ship controllability and navigation automation]. L.: Sudostroyeniye. 1976. 480 s.
8. Eyykhoff P. Osnovy identifikatsii sistem upravleniya [Fundamentals of Identification of Control Systems]. M.: Mir, 1975. 432 s.
9. Y.I. Yudin, R.G. Stepakhno. Identifikatsiya modeli sudna – vazhneyshiy element upravleniya bezopasnost'yu moreplavaniya [Identification of the vessel model is the most important element of navigation safety management]. Upravleniye bezopasnost'yu moreplavaniya i podgotovka morskikh spetsialistov SSN, 2003: Materialy III mezhdunar. konf. Kaliningrad, 2003.
10. Yudin Yu.I., Pashentsev S.V., Stepakhno R.G. Identifikatsii matematicheskoy modeli sudna [Identification of the Mathematical Model of a Vessel]. Monografiya. M.: MORKNIGA, 2015. 157 s.
11. Yudin Yu.I., Pashentsev S.V. Ispol'zovaniye printsipa maksimuma dlya parametricheskoy identifikatsii matematicheskoy modeli sudna [Use of the maximum principle for parametric identification of a mathematical model of a ship]. Nauka i tekhnika transporta. 2006. № 2. S. 100–107.
12. Kijima K. On the Maneuvering Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition. K. Kijima, at.al.. SNAJ, Nov. 1990
13. Kijima K. Prediction Method of Ship Maneuverability in Deep and Shallow waters. K. Kijima, at.al.. MARSIM & ICSM, June, 4.7, 1990.
14. Lee T. On an Empirical Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Modern Ship Hulls. T. Lee, et.al. Proceedings of MARSIM'03, Vol. III, August, 2003.

15. Nomoto K. A New Procedure of Analysing Zig.zag Test. K. Nomoto, K. Kose, Y. Yoshimura. Journal of the Society of Naval Architects of Japan. December 1973.
16. Nomoto K. A review of methods of defining and measuring the manoeuvrability of Ships. K. Nomoto, N. Norrbin. ITTC, Manoeuvrability Committee Report. 1969.
17. Nomoto K. On the steering Qualities of Ship. K. Nomoto, T. Taguchi, S. Hirano. International Shipbuilding Progress. 1957. Vol. 4, № 35. P. 354–370.
18. Studenikin D.Ye., Kondrat'yev S.I., Khekert Ye.V., Modina M.A. Dinamicheskoye formirovaniye koridora bezopasnosti pri planirovaniyu marshruta dvizheniya sudna [Dynamic formation of a safety corridor when planning a vessel's route]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2021. № 2-4 (52). S. 128-131.
19. Yoshimura Y., Nomoto K. Modeling of Maneuvering Behavior of Ships with Propeller Idling, Boosting and Reversing. JSNAJ, Vol.144, 1978.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Юрий Иванович Юдин**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовождения, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: [udinui@rambler.ru](mailto:udinui@rambler.ru)

**Yuri I. Yudin**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of navigation department, Admiral Ushakov Maritime State University, 353924, Russia, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, e-mail: [udinui@rambler.ru](mailto:udinui@rambler.ru)

**Сергей Иванович Позняков**, кандидат технических наук, доцент, капитан, Мурманский транспортный филиал ПАО «Норильский никель», 183038, г. Мурманск, Портовый проезд, д. 31, e-mail: [serpoz@mail.ru](mailto:serpoz@mail.ru)

**Sergey I. Poznjakov**, Ph.D. (Eng), assistant professor, captain, Murmansk transport branch of Norilsk Nickel, 183038, Murmansk, Port proezd, 31 e-mail: [serpoz@mail.ru](mailto:serpoz@mail.ru)

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2022.  
одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.04.2022.  
принята к публикации/accepted for publication 22.04.2022.

**Научная статья**

УДК 629.5.07

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.032>

## **Нейро-нечеткий подход для анализа опасности столкновения для морского судна**

**Н.А. Седова<sup>1</sup>** nellyfish81@mail.ru, **В.А. Седов<sup>1</sup>** sedov@msun.ru, **Р.И. Баженов<sup>2</sup>** r-i-bazhenov@yandex.ru,  
**И.В. Денисов<sup>3</sup>** e-mail: igordenisov@inbox.ru, **С.С. Бекназарова<sup>4</sup>** e-mail: saida.beknazarova@gmail.com

<sup>1</sup>Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, <sup>2</sup>Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, <sup>3</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта <sup>4</sup>Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми

**Аннотация.** Обеспечение безопасного судовождения морских судов возможно путём разработки программных и программно-аппаратных средств, обеспечивающих контроль за окружающей такие суда обстановкой. В статье предложены три модели для оценки степени опасности столкновения морского судна с надводными объектами, встречающимися на пути его движения. Модели отличаются входными параметрами - первая модель использует информацию о пеленге и дистанции, вторая – вычисляемую дистанцию и время сближения, третья – информацию о пеленге, скорости и курсе судна-цели, получаемые с радиолокационной станции. Каждая из моделей оперативно обрабатывает информацию с сенсоров для передачи в интеллектуальный блок, который принимает решение относительно необходимости осуществления манёвров расхождения с опасными объектами, обнаруженными на пути движения морского судна. Каждая модель исследована как в нечётком, так и в нейро-нечётком базисах. Для каждой модели проведено оценивание качества и проведено сравнение различных подходов к созданию моделей. Показано, что нейро-нечёткий подход позволяет практически однозначно определять степень опасности объектов для морского судна. Предложенные модели также целесообразно использовать при движении морских автономных надводных судов без экипажа на борту.

**Ключевые слова:** степень опасности столкновения, морское судно, дистанция кратчайшего сближения, время кратчайшего сближения, адаптивная система нейро-нечёткого вывода.

**Для цитирования:** Седова Н.А., Седов В.А., Баженов Р.И., Денисов И.В., Бекназарова С.С. Нейро-нечёткий подход для анализа опасности столкновения для морского судна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 245—251.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.032>

## **Neuro-fuzzy approach for collision risk analysis for a sea ship**

**Nelly A. Sedova<sup>1</sup>** nellyfish81@mail.ru, **Victor A. Sedov<sup>1</sup>** sedov@msun.ru,  
**Ruslan I. Bazhenov<sup>2</sup>** r-i-bazhenov@yandex.ru, **Igor V. Denisov<sup>3</sup>** igordenisov@inbox.ru,  
**Saida S. Beknazarova<sup>4</sup>**: saida.beknazarova@gmail.com

<sup>1</sup>Maritime state university named after admiral G.I. Nevelskoy, <sup>2</sup>Sholom-Aleichem Priamursky State University,  
<sup>3</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, <sup>4</sup>Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi

**Abstract.** Ensuring safe navigation of sea ships is possible through the development of software and hardware tools that ensure control over the navigation condition surrounding such ships. The article proposes three models for assessing the collision danger degree rate for a sea ship with overwater objects encountered along the path of movement. The models differ by their input parameters - the first model uses information about bearing and distance, the second uses the calculated distance and approach time, and the third uses information about bearing, speed and course of the target ship obtained from the radar station. Each of the models processes information from sensors and transmit it to control unit, which makes a decision for passing with dangerous objects detected on the way of a sea ship. Each model was investigated in fuzzy and neuro-fuzzy bases. For each model, a quality assessment was done and a comparison of various approaches to model creation was carried out. It is shown that the neuro-fuzzy approach makes it possible to almost unambiguously determine the collision danger of objects for a sea ship. The proposed models are also suitable for use while navigating autonomous surface ships without a crew on board.

**Keywords:** collision danger degree rating, sea ship, ship bearing, distance of shortest approach, time of shortest approach, adaptive neuro-fuzzy inference system.

**For citation:** Nelly A. Sedova, Victor A. Sedov, Ruslan I. Bazhenov, Igor V. Denisov, Saida S. Beknazarova, Neuro-fuzzy approach for collision risk analysis for a sea ship, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 245—251.

### **Введение**

Значительное число аварий и происшествий на море до сих пор в основном происходит из-за человеческого фактора [1]. При этой, объективная

оценка опасности столкновения судов зависит от многочисленных факторов, осложняется степенью их динамизма и неопределённости [2]. Судоводитель (или другое лицо, принимающее решения на судне) принимает решения не только на основе на основе

<sup>1</sup> © Седова Н.А., Седов В.А., Баженов Р.И., Денисов И.В., Бекназарова С.С. 2022

Международных правил предупреждения столкновений судов в море (МППСС), но и на основе своего ранее накопленного опыта по управлению судном, т.е. на основе так называемой «обычной или хорошей морской практики» [3]. При этом следование стандартам «обычной или хорошей морской практики» означает в том числе и своевременно учитывать ряд различных факторов, к которым можно отнести и учет окружающей навигационной обстановки, и выбор наиболее эффективных способов использования судовых средств наблюдения, оптимальных для конкретных условий плавания, и правильный выбор времени, места и способа осуществления манёвров и другие [3]. Учёт этих многочисленных факторов осуществляется по разному. Отечественные и зарубежные авторы приводят разнообразные модели, отличающиеся как группой учитывающихся факторов, так и методико-математическим аппаратом. Так, можно выделить работу [2], в которой предложен алгоритм для предупреждения столкновения судов с учётом полифакторной модели эксплуатации судна. В число учитывающихся факторов относятся: расстояние между судами, состояние окружающей среды и наличие определённых подцелей и ограничений. Как отмечают сами авторы [2], предложенная методика «служит начальным этапом построения интеллектуальных систем принятия решений для предупреждения столкновения судов». Также представляют интерес подход и полученные результаты, предложенные в работе [4], где предлагается гибкий расчет степени опасности с учетом окружающей обстановки в рамках МППСС с применением мультиагентного подхода, когда «нечеткие действия судов в любых условиях плавания могут координироваться на основе «кооперации».

Многочисленные исследования посвящены исследованию зон безопасности судов (доменов), попадая в которые судно-цель становится опасной целью для собственного судна. Например, можно выделить работу [5], в которой автором определяется риск возникновения аварийных ситуаций путём сочетания теории надёжности и теории нечётких множеств. Из зарубежных авторов можно выделить работу [6], в которой степень опасности столкновения судов определяется в зависимости от следующих трёх входных лингвистических переменных: степень нарушения домена (универсальное множество определяется как отрезок  $[0,1]$ , где нулевое значение соответствует полному отсутствию нарушения домена, а единичное значение - совпадению центров масс обоих судов), относительная скорость обоих судов, а также разница между направлениями движения судов.

Развитие науки и технологии производства, а также повышение общих стандартов безопасности судоходства являются причиной появления на судне большого числа систем управления и автоматизации, причем мировой тенденцией развития таких судовых систем является интеграция таких автоматизированных систем с целью повышения навигационной безопасности плавания, качества управления судном, минимизации влияния человеческого фактора, сокращения численности экипажа и при этом снижения нагрузки на моряка.



Рис. 1. Методика проведения интеллектуальной оценки степени опасности столкновения для морского судна

Такая тенденция стимулирует развитие автономных безэкипажных судов, где одной из важнейших задач является обеспечение безопасной навигации судна, оснащённого многочисленными сенсорами и компьютерными системами, обрабатывающими информацию, полученную с сенсоров, и принимающих решения, которые основываются только на показаниях сенсоров без участия «человеческого фактора». Таким образом, задача оценивания степени опасности столкновения с другими объектами, встречающимися на пути движения для такого типа судна, является особо актуальной.

Оценке степени опасности столкновения морского судна (в том числе и безэкипажного) с привлечением нечёткой логики и нейросетевых технологий посвящена настоящая работа.

Для обеспечения автоматической оценки степени опасности столкновения для морского судна разработаны три модели, каждая при этом оперативно обрабатывает информацию с сенсоров для передачи в интеллектуальный блок (рис. 1), который принимает решение относительно необходимости осуществления манёвров расхождения с опасными объектами, обнаруженными на пути движения морского судна (такие объекты будем называть судами-целями). Эти модели различаются по параметрам, в зависимости от которых оценивается опасность столкновения, при этом каждая модель исследована как в нечётком, так и в нейро-нечётком базисах. Привлечение нейросетевых технологий обусловлено тем, что результаты по точности определения степени опасности столкновения, выдаваемые моделями на базе теории нечетких множеств, недостаточно удовлетворительны. Нечёткая модель позволяет однозначно получить терм выходной лингвистической переменной, однако в тех случаях, когда имеется пересечение соседних термов, недостаточная точность решения может приводить к неоднозначному решению. Совместное использование с нечеткими моделями нейронных сетей для таких случаев обеспечивает более точный результат и как следствие, установление необходимого выходного решения.

Для оценки качества реализованных моделей выбраны традиционные оценки качества для прогнозных моделей, такие как средняя абсолютная

ошибка (Mean Absolute Error – MAE), симметрическая средняя абсолютная процентная ошибка (Symmetric Mean Absolute Percentage Error – SMAPE) [7] и средняя квадратическая ошибка (Root Mean Square Error – RMSE) [8]. Указанные оценки качества рассчитывались на тестовых примерах, общее число которых совпадает с числом правил базы нечётких производств для нечётких систем, для нейро-нечётких моделей помимо обучающих выборок дополнительно сформированы тестовые примеры по числу, равному числу примеров обучающей выборки.

В работе рассмотрим следующие модели оценки степени опасности столкновения морского судна (рис. 1):

- по характеру изменения полярных координат, таких как пеленг и дистанция [9];
- по вычисляемым дистанции и времени сближения [10];
- по информации о курсе и скорости морского судна, а также по результатам анализа радиолокационной информации [11], такой как пеленг, скорость и курс судна-цели.

Как отмечается в работе [12], процесс обеспечения автоматического предотвращения столкновений судов, условно можно разделить на три этапа: во-первых, это наблюдение за окружающей навигационной ситуацией с регулярным определением степеней опасности столкновения со всеми объектами, располагающимися в зоне принятия решений; во-вторых, в случае возникновения опасной для морского судна ситуации автоматическое определение оптимального манёвра расхождения (в случае отсутствия опасных ситуаций осуществление ранее намеченного плана движения), в-третьих, в случаях, когда имеется необходимость расхождения с опасными судами-целями, рассчитывается прогноз развития ситуации и осуществляется манёвр расхождения и, если опасность столкновения ослабляется, производится возвращение на свой первоначальный путь движения.

Исходя из результатов, выдаваемых вышеуказанными моделями, принимается решение о целесообразности осуществления манёвра расхождения, при этом на автономном безэкипажном судне предполагается подключение автоматической системы расхождения, которая самостоятельно выбирает и реализует манёвр расхождения (рис. 1).

В случае использования предложенных моделей на судах с экипажем, выдаваемые моделями значения степени опасности столкновения учитываются лицом, принимающим решение на судне, однако осуществление манёвров осуществляется в ручном режиме.

Как отмечается в [12] при моделировании систем, предназначенных для интеллектуального анализа навигационных ситуаций и для предупреждения столкновений морского судна необходимо учитывать такие факторы, как динамические характеристики окружающей среды и сложные характеристики движения самого судна. Каждый из модулей, входящих в блок «Интеллектуальная оценка» (рис. 1), может быть реализован как в нечётком, так и в

нейро-нечётком базисах, однако выбор такого базиса зависит от результатов, выдаваемых каждым из модулей. Получению качественных оценок, подтверждающих выбор того или иного базиса для этих модулей, направлена настоящая работа.

#### **Модель оценки степени опасности столкновения морского судна по характеру изменения полярных координат, таких как пеленг и дистанция**

Предложена модель оценки степени опасности столкновения морского судна с судами-целями, которые могут встретиться на его пути. Модель основана на теории нечётких множеств и подразумевает получение характеристики судна-цели на основе двух входных переменных: «Изменение пеленга на встреченный объект» и «Изменение дистанции» в период наблюдения за объектом-целью. Выходная переменная сформулирована как «Краткая характеристика судна-цели», эта переменная имеет в качестве универсума интервал [0, 100], причем, чем выше величина характеристики цели, тем опаснее судно-цель по отношению к собственному морскому судну.

Краткая характеристика судна-цели определена следующими значениями [13]: судно-цель неопасно, удаляется (NY), судно-цель неопасно, манёврирует (NM), судно-цель неопасно, проходит по корме (NP), судно-цель неопасно, сателлит (NS), судно-цель опасно (O). Другими словами, выходная лингвистическая переменная определяет опасную судно-цель от целей, которые опасными для собственного морского судна не являются.

По информации, полученной от экспертов, являющихся судоводителями, осуществлена фазификация всех переменных, а также сформирована база правил нечётких производств. Для предложенной нечёткой модели (по характеру изменения полярных координат, таких как пеленг и дистанция) рассчитаны оценки качества, они приведены во второй строке таблицы 1.

Поскольку значения получились удовлетворительные, то принято решение о модификации нечёткой модели использованием нейросетевых технологий, при этом применена и исследована адаптивная система нейро-нечёткого вывода ANFIS (от Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) (рис. 2).

Проведена серия компьютерных экспериментов, цель которых заключалась в определении оптимальных параметров нейро-нечёткой модели ANFIS, для этого составлена обучающая выборка, состоящая из 561 обучающего примера.

В результате компьютерного моделирования получена наилучшая модель, оценки качества которой приведены в последней строке таблицы 1. Заметим, что в таблице 1 расчёт MAE, RMSE и SMAPE осуществлялся на 561 тестовых примерах, полученных от судоводителей-экспертов, причём множество тестовых примеров не было включено в обучающее множество. Значение среднеквадратичной ошибки, полученной в процессе обучения, для указанной ANFIS – модели на обучающей выборке равнялось  $2.8819 \cdot 10^{-3}$ .

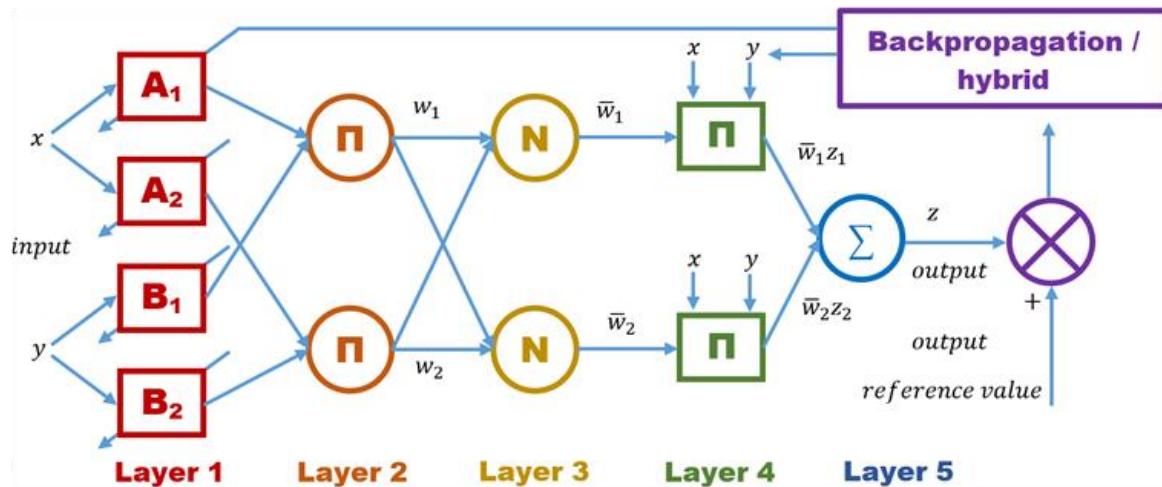


Рис. 2. ANFIS-модель для оценки степени опасности столкновения судна по характеру изменения наблюдаемых полярных координат

$x$  – входная лингвистическая переменная «Изменение пеленга»,  $y$  – входная лингвистическая переменная «Изменение дистанции»,  $output$  – выходная лингвистическая переменная «Краткая характеристика судна-цели»

Таблица 1  
Результаты расчёта оценок качества для нечёткой и нейро-нечёткой модели оценки степени опасности столкновения морского судна по характеру изменения полярных координат (пеленг и дистанция)

	MAE	RMSE	SMAPE
FIS - модель	6.0651	8.476	0.1038
ANFIS - модель	$2.3773 \cdot 10^{-4}$	$4.1833 \cdot 10^{-4}$	$4.4857 \cdot 10^{-6}$

#### Модель оценки степени опасности столкновения морского судна от ожидаемых дистанции и времени кратчайшего сближения

Разработана модель (рис. 3), в которой уровень опасности столкновения собственного морского судна с судами-целями определяется в зависимости от значений ожидаемой дистанции кратчайшего сближения (Distance at Closest Point of Approach (DCPA) и ожидаемого времени кратчайшего сближения (Time to Closest Point of Approach (TCPA).

На рисунке 3 представлены фрагменты этой модели в нечётком базисе (имеется структура базы правил нечётких продуктов и трёхмерная зависимость выходной переменной «Опасность столкновения» от двух входных переменных: дистанции и времени кратчайшего сближения). Выходная лингвистическая переменная «Опасность столкновения» характеризуется базовым термомножеством {очень низкая, низкая, средняя, высокая, очень высокая}, а универсальное множество для этой переменной взято в диапазоне от 0 до 100 (чем выше, тем опаснее), причем в случае, когда модель выдаёт первые два терма (очень низкая и низкая), то никакие оповещения для лица, принимающего решения на судне, не передаются. При формировании базы правил нечётких продуктов использовалась информация с [10].

Разработана также модель аддитивной системы нейро-нечёткого вывода ANFIS, для формирования которой также использовались две входные переменные DCPA и TCPA, для неё составлена соответствующая обучающая выборка, состоящая из 30 обучающих примеров, проведено моделирование, в результате которого получена наилучшая модель, все соответствующие оценки качества показаны в таблице 2. Проведено компьютерное моделирование в математическом пакете Matlab, в результате изменения параметров нейро-нечёткой системы ANFIS выбрана наилучшая, которой оказалась нейро-нечёткая модель ANFIS при генерировании по алгоритму решётчатого разбиения без кластеризации, которая имеет трапециевидные функции принадлежности для входных переменных и линейные коэффициенты для выходной переменной.

И для нечёткой модели, и для нейро-нечёткой модели рассчитаны оценки качества, результаты приведены в таблице 2. Заметим, что в таблице 2 расчёт MAE, RMSE и SMAPE осуществлялся на 56 тестовых примерах, полученных от судоводителей-экспертов, причём для проведения объективного тестирования множество тестовых примеров не было включено в обучающее множество. Значение среднеквадратичной ошибки обучения ANFIS – модели равнялось  $1.2123 \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 2  
Результаты расчёта оценок качества для нечёткой и нейро-нечёткой модели оценки степени опасности столкновения морского судна DCPA и TCPA

	MAE	RMSE	SMAPE
FIS - модель	3.9857	6.0902	0.0367
ANFIS - модель	$1.7857 \cdot 10^{-6}$	$1.3363 \cdot 10^{-5}$	$1.634 \cdot 10^{-8}$

### Модель оценки степени опасности столкновения морского судна по четырём переменным

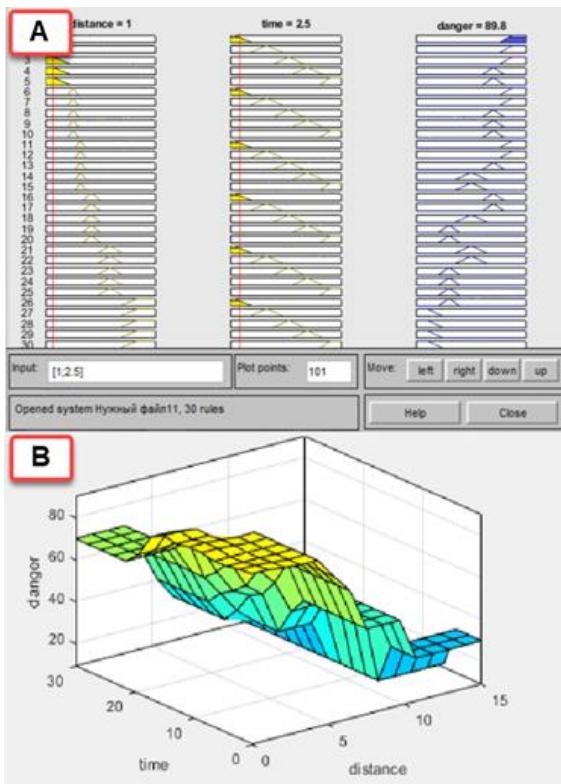


Рис. 3. Оценка степени опасности столкновения морского судна по ожидаемым дистанции и времени сближения с судном-целью  
А) База ПНП, В) График 3D зависимости

Наконец, предложена третья модель для оценки степени опасности столкновения, которая основывается на информации по четырём переменным (рис. 4): пеленг; курс автономного безэкипажного судна; курс судна-цели, т.е. судна, которое попало в зону чрезмерного сближения с собственным морским судном, а также значение относительной скорости, т.е. значение отношения скорости судна-цели к скорости нашего морского судна. В модели присутствует лингвистическая переменная «относительная скорость» как отношение скоростей собственного судна и судна-цели с тем, чтобы снизить число правил нечётких продукций, поскольку их число определяется как произведение мощностей базовых терм-множеств входных лингвистических переменных. Для каждого правила нечётких продуктов была осуществлена раскладка на маневренном планшете, в результате определена степень опасности судна-цели (требуется маневр расхождения с судном-целью или нет). Выходная лингвистическая переменная имеет три терма (низкая, средняя и высокая), при этом оповещение лицу, принимающему решение на судне, передаётся в случае среднего или высокого значений для выходной лингвистической переменной.

Используя информацию, полученную от судоводителей, осуществлена фазификация всех переменных, а также сформирована база правил нечётких продуктов, состоящая из 525 правил.

Для третьей модели также была проведена серия компьютерных экспериментов, проведены

соответствующие расчёты по определению оценок качества моделей (результаты представлены в табл. 3). Заметим, что в таблице 3 расчёт MAE, RMSE и SMAPE осуществлялся на 525 тестовых примерах, для каждого примера судоводителем-экспертом осуществлена раскладка на маневренном планшете для определения терма выходной лингвистической переменной. Значение среднеквадратичной ошибки, полученной в результате обучения ANFIS – модели, равнялось  $2,9235 \cdot 10^{-7}$ .



Рис. 4. Интеллектуальная оценка степени опасности столкновения морского судна по четырём переменным

Также безусловным выводом является то, что нейро-нечёткая модель выдаёт значительно лучшие результаты, чем нечёткая модель.

Таблица 3  
Результаты расчёта оценок качества для нечёткой и нейро-нечёткой модели оценки степени опасности столкновения морского судна по четырём переменным

	MAE	RMSE	SMAPE
FIS - модель	$1,235 \cdot 10^{-1}$	$1,366 \cdot 10^{-1}$	$3,599 \cdot 10^{-1}$
ANFIS - модель	$2,4894 \cdot 10^{-11}$	$1,6522 \cdot 10^{-10}$	$1,0626 \cdot 10^{-10}$

### Заключение

Таким образом предложены три различных подхода к оценке степени опасности столкновения морского судна с различными объектами, встретившимися на его пути.

Все три подхода реализованы в нечётком и нейро-нечётком базисах, при этом в математическом пакете Matlab проведено компьютерное моделирование, показавшее, что для всех рассмотренных подходов безусловным высоким качеством обладают нейро-нечёткие модели ANFIS.

Следует отметить, что создание интеллектуальной системы, содержащей все перечисленные в работе входные переменные с целью получения единой унифицированной оценки степени опасности, считаем нецелесообразным, т.к. это приводит к значительному усложнению базы правил нечётких продуктов (в случае нечёткого подхода) и существенными сложностями для формирования обучающей выборки (в случае нейро-

нечёткого подхода). Дальнейшие исследования будут направлены на разработку интеллектуальной системы по оценке степени опасности столкновения судна, которая по информации, выдаваемой предложенными в настоящей работе нейро-нечёткими моделями будет выдавать единое значение степени опасности столкновения судна с

встреченными судами-целями. Исходя из величины этого итогового значения будет приниматься решение относительно передачи соответствующего оповещения лицу, принимающему решение на судне, а также целесообразности включения автоматической системы расхождения для автономных безэкипажных судов.

### Литература

1. Курбенков, В. А. Анализ проблем обеспечения безопасности на море: состояние и решения / В. А. Курбенков, А. П. Пурденко // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4-5(42). – С. 216-223.
2. Кондратьев С.И. Полифакторный анализ процесса предупреждения столкновения судов / С.И. Кондратьев, А.Л. Боран-Кешишьян // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – Вып.2., 2013. – С.7-13.
3. Дмитриев, В. И. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 6. – С. 1149-1158. – DOI 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.
4. Астерин В. В. Принципы координации подсистем судна для предупреждения столкновений / В. В. Астерин, Е. В. Хекерт // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – вып.2, 2013. – С. 13-22.
5. Куклев Е.А. Определение рисков возникновения опасных сближений морских судов в аварийных ситуациях путем прогнозирования нечетких «Окон уязвимости» / Е.А. Куклев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2016. – 4(65) – С. 28-31.
6. Szłapczyński, Rafał and Niksa-Rynkiewicz, Tacjana. "A Framework of A Ship Domain-Based Near-Miss Detection Method Using Mamdani Neuro-Fuzzy Classification" Polish Maritime Research, vol.25, no.s1, 2018, pp.14-21. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0017>
7. Augmented Ship Tracking under Occlusion Conditions from Maritime Surveillance Videos / X. Chen, X. Xu, Y. Yang [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 42884-42897. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2978054.
8. Uyanık, T. Machine learning approach to ship fuel consumption: A case of container vessel / T. Uyanık, Ç. Karatuğ, Y. Arslanoğlu // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2020. – Vol. 84. – P. 102389. – DOI 10.1016/j.trd.2020.102389.
9. Седов, В. А. Определение степени опасности столкновения судов по характеру изменения наблюдаемых полярных координат с помощью теории нечетких множеств / В. А. Седов, Н. А. Седова // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2014. – Т. 1. – С. 103-105.
10. Седова, Н. А. Оценка степени опасности наблюдаемой цели на море с использованием систем искусственного интеллекта / Н. А. Седова, В. А. Седов, Н. Г. Левченко // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 4-3(38). – С. 106-114.
11. Попов, А. Н. АИС в системе НУИК АСУТП концепции е-навигации / А. Н. Попов, В. В. Шканов // Транспортное дело России. – 2018. – № 3. – С. 137-141.
12. Баракат, Л. Предотвращение столкновений безэкипажных судов с использованием глубокого обучения с подкреплением / Л. Баракат // Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем (ИКМ МТМТС-2019) : Пятая международная научно-практическая конференция. Труды конференции, Санкт-Петербург, 10 июля 2019 года. – Санкт-Петербург: Издательство "Перо", 2019. – С. 102-105.
13. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса : Морской тренажерный центр, 2008. – 235 с.

### References

1. Kurbenkov, V. A. Analiz problem obespechenija bezopasnosti na more: sostojanie i reshenija [Analysis of Maritime Safety Problems: Status and Solutions] Morskie intellektual'nye tehnologii. 2018. № 4-5(42). S. 216-223.
2. Kondrat'ev S.I. Polifaktornyj analiz processa preduprezhdenija stolknovenija sudov / S.I. Kondrat'ev, A.L. Boran-Keshish'jan // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – Vyp.2., 2013. – S.7-13.
3. Dmitriev, V. I. Metody obespechenija bezopasnosti moreplavaniya pri vnedrenii bespilotnyh tehnologij [Methods for ensuring the safety of navigation when introducing unmanned technologies] Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2017. T. 9. № 6. S. 1149-1158. DOI 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.
4. Asterin V. V. Principy koordinacii podsistem sudna dlja preduprezhdenija stolknovenij / V. V. Asterin, E. V. Hekert // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – vyp.2, 2013. – S. 13-22.
5. Kuklev E.A. Opredelenie riskov vozniknenija opasnyh sblizhenij morskih sudov v avarijsnyh situacijah putem prognozirovaniya nechetkih «Okon ujazvimosti» / E.A. Kuklev // Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, jekonomike. – 2016. – 4(65) – S. 28-31.
6. Szłapczyński, Rafał and Niksa-Rynkiewicz, Tacjana. "A Framework of A Ship Domain-Based Near-Miss Detection Method Using Mamdani Neuro-Fuzzy Classification" Polish Maritime Research, vol.25, no.s1, 2018, pp.14-21. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0017>

7. Augmented Ship Tracking under Occlusion Conditions from Maritime Surveillance Videos / X. Chen, X. Xu, Y. Yang [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 42884-42897. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2978054.
8. Uyanık, T. Machine learning approach to ship fuel consumption: A case of container vessel / T. Uyanık, Ç. Karatuğ, Y. Arslanoğlu // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2020. – Vol. 84. – P. 102389. – DOI 10.1016/j.trd.2020.102389.
9. Sedov, V. A. Opredelenie stepeni opasnosti stolknovenija sudov po harakteru izmenenija nabljudaemyh poljarnyh koordinat s pomoshh'ju teorii nechetkikh mnozhestv [Determining the degree of risk of collisions by the nature of the observed changes in polar coordinates using the fuzzy set theory] Mezhdunarodnaja konferencija po mjagkim vychislenijam i izmerenijam. 2014. T. 1. S. 103-105.
10. Sedova, N. A. Ocenna stepeni opasnosti nabljudaemoj celi na more s ispol'zovaniem sistem iskusstvennogo intellekta [Assessment of the danger degree of the observed target at sea using artificial intelligence systems] Morskie intellektual'nye tehnologii. 2017. № 4-3(38). S. 106-114.
11. Popov, A. N. AIS v sisteme NUIK ASUTP koncepcii e-navigacii [AID in the system of the NWIC APCS concept of E-navigation] Transportnoe delo Rossii. 2018. № 3. S. 137-141.
12. Barakat, L. Predotvrazhenie stolknovenij bezjekipaznyh sudov s ispol'zovaniem glubokogo obuchenija s podkrepleniem [Collision avoidance for unmanned vessels using deep reinforcement learning] Imitacionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoy tekhniki i morskikh transportnyh sistem (IKM MTMTS-2019) : Pjataja mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija. Trudy konferencii, Sankt-Peterburg, 10 iulja 2019 goda. – Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo "Pero", 2019. – S. 102-105.
13. Mal'cev A.S. Manevrirovanie sudov pri rashozhdenii [Maneuvering vessels when diverging] Odessa : Morskoy trenazhernyj centr, 2008. 235 s.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Нелли Алексеевна Седова**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических и информационных систем факультета электроники и информационных технологий. Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а. e-mail: nellyfish81@mail.ru

**Виктор Александрович Седов**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники электромеханического факультета Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а. e-mail: sedov@msun.ru

**Руслан Иванович Баженов**, кандидат педагогических, доцент, заведующий кафедрой информационных систем, математики и правовой информатики факультета математики, информационных технологий и техники, Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема. 679015, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70А. e-mail: r-i-bazhenov@yandex.ru

**Игорь Викторович Денисов**, доктор технических наук, доцент, профессор Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта, 236016, Калининград, ул. А. Невского, 14, e-mail: igordenisov@inbox.ru

**Саида Сафибулаевна Бекназарова**, доктор технических наук, профессор кафедры аудиовизуальных технологий факультета телевизионных технологий, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, 100099, г. Ташкент, ул. А.Тимура, 108, Узбекистан. e-mail: saida.beknazarova@gmail.com

**Nelly A. Sedova**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automatic and Information Systems of the Faculty of Electronics and Information Technologies, Maritime state university named after admiral G.I. Nevelskoy. 50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia. e-mail: nellyfish81@mail.ru

**Victor A. Sedov**, Ph.D. (Phys & Math), Associate Professor, The Head of Electrical Theory Bases Dept., Maritime state university named after admiral G.I. Nevelskoy. 50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia. e-mail: sedov@msun.ru

**Ruslan I. Bazhenov**, Ph.D. (Pedagogy), Associate Professor, Head of the Department of Information Systems, Mathematics and Legal Informatics of the Faculty of Mathematics, Information Technologies and Engineering, Sholom-Aliechem Priamursky State University. 70A, Shirokaya st., 679015, Birobidzhan, Russia. e-mail: r-i-bazhenov@yandex.ru

**Igor V. Denisov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Institute of physycal-mathematical sciences and informaion technologies of I. Kant Baltic Federal University, Nevskogo, 14, Kaliningrad, 236016, Russian Federation, e-mail: igorenisov@inbox.ru

**Saida S. Beknazarova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department Audiovisual Technologies, Faculty Television Technologies, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi. 108, A. Timur st., 100099, Tashkent, Uzbekistan e-mail:saida.beknazarova@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.11.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.04.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 27.04.2022.

**Научная статья**

УДК 621.396.969

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.033>

## **Повышение точности местоопределения объектов вторжения радиолокационными средствами обнаружения со сверхсканированием**

**В.В. Ольшанский<sup>1</sup>** olshanskiy@iwtshedov.ru, **С.В. Мартемьянов<sup>1</sup>** martemjanov@iwtshedov.ru,  
**Н.Ю. Сафонцева<sup>1</sup>** safontseva@iwtshedov.ru, **В.Б. Гунько<sup>2</sup>** gunko.56@inbox.ru

<sup>1</sup>Институт Водного Транспорта имени Г.Я. Седова филиал ФГБОУ ВО «Государственный Морской Университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», <sup>2</sup> Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации»

**Аннотация.** В статье рассмотрена математическая модель местоопределения объектов вторжения применительно к радиолокационным техническим средствам обнаружения со сверхбыстрым законом сканирования луча антенны в угловом секторе обзора контролируемой территории. Опыт эксплуатации систем охраны показывает, что для обеспечения зон безопасности морских терминалов, гидротехнических сооружений, акваторий морских портов и т.п. существенным является определение местоположения объекта вторжения на максимально допустимой дальности. Предложенный алгоритм функционирования позволяет учесть различия законов сканирования луча антенны при излучении и приеме сигналов в секторе обзора, а также местоположения по дальности объекта вторжения внутри формируемого «слоя видимости». Полученные аналитические зависимости позволяют повысить потенциальную точность местоопределения лоцируемого объекта за счет устранения методических погрешностей, связанных с применением традиционных алгоритмов функционирования в системах со сверхсканированием. Практическая реализация предложенной математической модели повлияет на общую эффективность систем безопасности, и, в частности, объектов транспортной инфраструктуры.

**Ключевые слова:** сверхбыстрое сканирование (сверхсканирование), системы охраны, диаграмма направленности антенны, слой видимости, местоопределение.

**Для цитирования:** Ольшанский В.В., Мартемьянов С.В., Сафонцева Н.Ю., Гунько В.Б. Повышение точности местоопределения объектов вторжения радиолокационными средствами обнаружения со сверхсканированием. 2022. № 2 часть 1. С. 252—257.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.033>

## **Improving the accuracy of locating invasion objects by radar detection means with superscanning**

**Vladimir V. Olshanskiy<sup>1</sup>** e-mail: olshanskiy@iwtshedov.ru, **Sergei V. Martemyanov<sup>1</sup>** martemjanov@iwtshedov.ru,  
**Natalia Yu. Safontseva<sup>1</sup>** safontseva@iwtshedov.ru, **Vitaly B. Gunko<sup>2</sup>** gunko.56@inbox.ru

<sup>1</sup> Sedov Water Transport Institute branch of the Admiral Ushakov Maritime State University,

<sup>2</sup> Federal State Educational Institution of Higher Education "Rostov Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation"

**Abstract.** The article considers a mathematical model of the location of invasion objects in relation to radar detection equipment with an ultrafast scanning law of the antenna beam in the angular sector of the survey of the controlled territory. The experience of operating security systems shows that in order to ensure the security zones of sea terminals, hydraulic structures, seaports, etc., it is essential to determine the location of the invasion object at the maximum permissible range. The proposed algorithm of operation makes it possible to take into account the differences in the laws of scanning the antenna beam when emitting and receiving signals in the viewing sector, as well as the location of the intrusion object within the formed "visibility layer". The obtained analytical dependences make it possible to increase the potential accuracy of locating the object being located by eliminating methodological errors associated with the use of traditional algorithms for functioning in systems with overscanning. The practical implementation of the proposed mathematical model will affect the overall effectiveness of security systems, and, in particular, transport infrastructure facilities.

**Key words:** ultra-fast scanning (superscanning), security systems, antenna radiation pattern, visibility layer, location.

**For citation:** Vladimir V. Olshanskiy, Sergei V. Martemyanov, Natalia Yu. Safontseva, Vitaly B. Gunko, Improving the accuracy of locating invasion objects by radar detection means with superscanning. 2022. № 2 part 1. P. 252—257.

### **Введение**

Предложенная математическая модель формирования требуемого ракурса зондирования местности и ее апробация на примере участка порта Новороссийск [1], показывают, что для обеспечения

надёжной защиты объектов транспортной инфраструктуры [2] возможно применение радиолокационных средств обнаружения (РЛСО). Повышение эффективности систем охраны с помощью РЛСО достигается построением пространственных зон контроля, охватывающих

территорию объекта по всей его площади и формирующих в пространстве полусферу [3]. Использование в РЛСО методов сверхбыстрого сканирования (СБС) позволяет не только фиксировать проникновение на охраняемую территорию, отслеживать перемещения внутри контролируемой зоны, но формировать необходимую конфигурацию зоны обнаружения в заданном секторе обзора.

В этом случае, задача обнаружения объекта вторжения решается путём определения такой совокупности специфических признаков, которые выделяют злоумышленника или используемые им технические средства (например, дроны) из множества других объектов, являющихся фоном. Эти демаскирующие признаки, присутствуют в отражённых от объекта радиоволнах, которые принимаются РЛСО. Параметры принимаемого сигнала РЛСО, на основе которых делают вывод об обнаружении объекта вторжения, несут в себе информацию о характеристиках обнаруживаемого объекта.

При этом обнаружение объектов вторжения, а, следовательно, и первичное определение их местоположения, обычно осуществляют на предельной (максимально допустимой) дальности, что позволяет рассматривать такие объекты как точечные цели [3, 4].

Рассмотрение обнаруживаемых объектов вторжения как точечных радиолокационных целей на этапе их обнаружения и определение их местоположения в пространстве справедливо и для случая их протяжённого характера.

Протяжённые радиолокационные цели могут быть представлены конечным числом «светящихся точек», поэтому задача определения местоположения всего объекта сводится к определению местоположения этих «светящихся точек» [5].

Таким образом, определение местоположения обнаруженного объекта вторжения сводится к решению традиционной задачи радиолокации — определению местоположения точечной цели в пространстве обзора.

Нетривиальность рассмотрения задачи местоопределения объекта вторжения объясняется применением в рассматриваемом РЛСО методов сверхбыстрого сканирования.

Цель работы. Разработка математической модели местоопределения объекта вторжения РЛСО со сверхбыстрым законом сканирования луча антенны и оценка её точностных характеристик.

### Постановка задачи

Проблема местоопределения объекта вторжения в контролируемой зоне заключается в измерении некоторых демаскирующих признаков, однозначно выделяющихся на естественном фоне и характеризующих положение объекта в пространстве.

Так как РЛСО охватывают контролируемую территорию по всей его площади, формируя в пространстве полусферу, то для однозначного определения местоположения объекта в пространстве требуется измерение трех координат: наклонной дальности ( $R$ ), азимута ( $\alpha$ ) и угла места ( $\beta$ ) [6].

При обобщении угловых координат ( $\alpha$ ) и ( $\beta$ ) в параметр  $\theta = \{\alpha, \beta\}$  сканирование по углу  $\theta(t)$  при организации работы РЛСО можно представить как сканирование по одной из угловых координат  $\alpha(t)$  при  $\beta=\beta_0=const$  или  $\beta(t)$  при  $\alpha=\alpha_0=const$ , либо как сканирование по двум угловым координатам  $\{\alpha(t), \beta(t)\}$ , что отражает лишь организуемый в данный момент способ обзора контролируемой области пространства.

В данном случае длину траектории распространения радиоволн примем за дальность  $R$ , а за  $\theta$  — угловое направление на излучатель радиоволн.

Рассмотрим особенности функционирования РЛСО с использованием методов сверхбыстрого сканирования в режиме местоопределения обнаруживаемых объектов вторжения в контролируемой области пространства.

При одноантенном варианте построения РЛСО с использованием методов быстрого сканирования для излучения и приёма сигналов используют одну антенну, имеющую узкую диаграмму направленности (ДНА) шириной  $\theta_0 \ll \theta_{\text{обз}}$  [5]. При работе на излучение за время  $\tau_{\text{изл}}$  луч антенны поворачивается на заданный угол  $\theta_{\text{обз}}$ , т.е. излучает энергию импульса во всем угловом секторе обзора. Затем по окончании излучения луч антенны «быстро» возвращается в исходное положение  $\theta_h$  и начинает сканировать по тому или иному закону  $\theta_{\text{пр}}(t)$ , для приема сигналов, отражённых от объектов, из всего сектора обзора. Такое РЛСО за один период обзора  $T_{\text{изл}}$  осуществляет качание ДНА по углам  $\theta$  во всем заданном секторе  $\theta \in [\theta_h, \theta_h + \theta_{\text{обз}}]$  в дискретных областях по дальности, что в результате образует периодическую пространственную структуру из «слоёв видимости» [5].

Таким образом, РЛСО с использованием сверхбыстрого сканирования в режиме местоопределения автоматически осуществляет стробирование по дальности, что позволяет измерять её с погрешностью:

$$\Delta R = c\tau_{\text{пр}} \frac{\theta_0}{2\theta_{\text{обз}}},$$

где  $c$  — скорость распространения

электромагнитных волн,  $\tau_{\text{пр}}$  — время однократного сканирования луча антенны в угловом секторе обзора  $[\theta_h, \theta_h + \theta_{\text{обз}}]$  при приёме отражённого сигнала.

При наблюдении точечных (квазиточечных) объектов с помощью РЛСО на основе методов сверхбыстрого сканирования в случае равенства законов СБС при излучении и приёме:

$$t_{\text{изл}}(\theta) = t_{\text{пр}}(\theta) = t(\theta) = \tau \theta / \theta_{\text{обз}},$$

$$\tau = \tau_{\text{изл}} = \tau_{\text{пр}} = t(\theta_{\text{обз}}),$$

когда временем возвращения луча антенны в исходное положение можно пренебречь ( $\tau_b \approx 0$ ), то в режиме приёма луч антенны окажется в исходном положении в моменты времени

$$t_j = j\tau, j = \overline{1, K}, \quad K = \frac{2R_{\max}}{c\tau} - 1,$$

где  $R_{\max}$  — максимальный радиус контролируемой территории.

При  $t_i = \frac{2R_{\text{ц}}}{c}, i = \overline{1, n}$ ,  $n = \theta_{\text{обз}}/\theta_0$  где  $R_{\text{ц}}$  — наклонная дальность от РЛСО до объекта вторжения (дальность до цели), пришедший отражённый сигнал

длительностью  $\tau_0 = \tau \theta_0 / \theta_{063}$  будет принят полностью.

Если же антenna окажется в исходном положении со сдвигом по времени на интервал  $\Delta t_{ij} = 2R_{ij}/c - t_j$ , что эквивалентно изменению местоположения точечного объекта внутри формируемого слоя видимости, то может быть принята только часть отражённого сигнала длительностью:

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_0 - \Delta t_{ij},$$

при  $\Delta t_{ij} \geq \tau_0$  сигнал не может быть принят ( $\tau_{\text{пр}} \equiv 0$ ).

Расположение точечного объекта в пределах «слоя видимости» влияет на длительность принимаемого сигнала и его форму.

Если наклонную дальность  $R$  можно с удовлетворительной точностью измерять известными методами [7], то пеленгация лоцируемых объектов вторжения известными способами для РЛСО с использованием методов сверхбыстрого сканирования приводит к методическим погрешностям измерений, существенно превосходящим другие составляющие погрешности измерения угловых координат [7, 8].

Таким образом, необходимо на основе известного способа измерения угловых координат [8] разработать математическую модель местоопределения объекта вторжения РЛСО со сверхбыстрым законом сканирования луча антенны.

#### Разработка математической модели местоопределения объекта вторжения РЛСО со сверхбыстрым законом сканирования луча антенны

Известный способ измерения угловых координат [8] для систем, использующих методы сверхбыстрого сканирования, основан на том, что момент времени окончания приёма сигнала от объекта вторжения ( $t_3$ ) для любого направления является строго фиксированным. Поэтому данный параметр может быть использован для разработки алгоритма местоопределения точечного объекта, внутри формируемого «слоя видимости» [7]. На рис.1 представлена временная диаграмма распределения амплитуды принимаемого сигнала от объекта внутри «слоя видимости». Отсчеты времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  от момента начала сканирования ДНА на приём характеризуют соответственно время превышения некоторого порогового значения  $U_{\text{пор}}(t)$ , время достижения максимума амплитуды принятого сигнала  $U_{C \text{ max}}(t)$  и время снижения амплитуды до некоторого порога  $U_{\text{пор}}(t)$ .

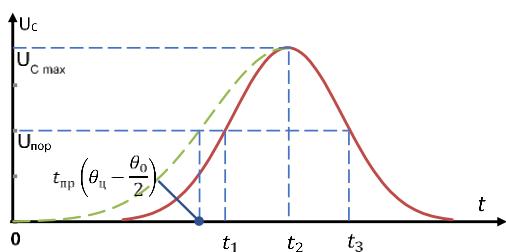


Рис. 1. График зависимости амплитуды от времени принимаемого сигнала

Однако, как отмечено ранее, в РЛСО с СБС формируются в пространстве обзора «слои

видимости», из которых осуществляется приём отражённых сигналов. В представленном на рис. 2 плоском случае, «слой видимости» в угловом секторе обзора  $[\theta_h, \theta_h + \theta_{063}]$  характеризуется шириной  $\Delta R(\theta)$ , которая зависит от скорости сканирования и ширины ДНА  $\theta_0$ , что в свою очередь эквивалентно стробу  $\tau_0$  по дальности для традиционных систем локации [5, 9].

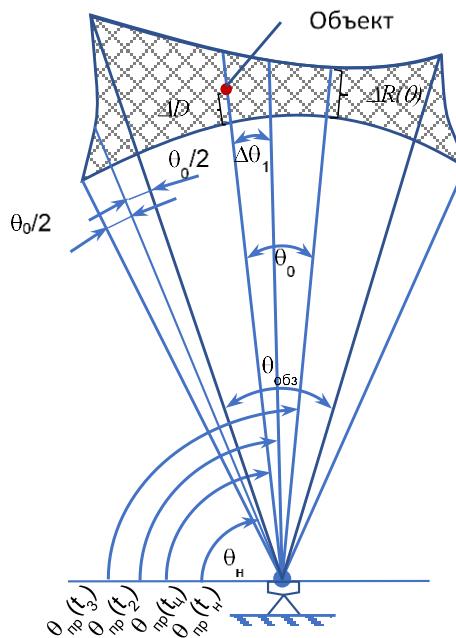


Рис. 2. Геометрическая интерпретация плоскости сканирования секторе обзора

Отклонение от направления на цель  $\theta_{\text{ц}}$  на угол  $\Delta\theta_1$  связано с двумя факторами: первый – лоцируемый объект находится внутри формируемого «слоя видимости», второй – сверхбыстрым сканированием ДНА. Поэтому за время распространения сигнала от нижнего уровня «слоя видимости» до лоцируемого объекта  $\Delta D$  и обратно ДНА повернётся угол  $\Delta\theta_1$  и будет находиться в направлении [8]

$$\Delta\theta_1 = \theta_{\text{пр}}(t_2) + \frac{\theta_0}{2} - \theta_{\text{ц}} = \theta_{\text{пр}}\left(t_{\text{пр}}\left(\theta_{\text{ц}} - \frac{\theta_0}{2}\right) + \Delta t_{ij}\right) + \frac{\theta_0}{2} - \theta_{\text{ц}}, \quad (1)$$

где

$$\theta_{\text{пр}}(t_{\text{пр}}(\theta)) \equiv \theta.$$

Так как момент времени ( $t_3$ ) соответствующий окончанию приёма сигнала от лоцируемого объекта точечной структуры внутри формируемого, то направление на цель  $\theta_{\text{ц}}$  необходимо вычислять согласно выражению

$$\theta_{\text{ц}} = \theta_{\text{пр}}(t_3) - \frac{\theta_0}{2},$$

то отличие законов сканирования ДНА в процессе излучения  $\theta_{\text{изл}}(t)$  и приёма  $\theta_{\text{пр}}(t)$  сигналов равносильно различию длительности  $\tau_{\text{изл}}(\theta)$  излученного в направлении  $\theta$  импульса [5]

$$\tau_{\text{изл}}(\theta) = t_{\text{изл}}\left(\theta + \frac{\theta_0}{2}\right) - t_{\text{изл}}\left(\theta - \frac{\theta_0}{2}\right); \quad (3)$$

$$t_{\text{изл}}(\theta_{\text{изл}}(t)) \equiv t,$$

и длительности  $\tau_{\text{пр}}(\theta)$  формируемого в этом направлении «строба» [5, 9]

$$\tau_{\text{пр}}(\theta) = t_{\text{пр}}\left(\theta + \frac{\theta_0}{2}\right) - t_{\text{пр}}\left(\theta - \frac{\theta_0}{2}\right). \quad (4)$$

Следовательно, для однозначной «привязки» к моменту времени ( $t_3$ ) окончания формируемого в направлении объекта  $\theta_{\text{ц}}$  строба необходимо выполнение одного из условий [8]:

$$\begin{aligned}\Delta t(\theta) &= \tau_{\text{пр}}(\theta) - \tau_{\text{изл}}(\theta) < 0, \\ \Delta t(\theta) &= \tau_{\text{пр}}(\theta) - \tau_{\text{изл}}(\theta) \geq 0.\end{aligned}\quad (5)$$

Физический смысл проверки условий (5) означает сравнение длительностей, формируемых в направлении  $\theta$  строба и сигнала, что определяет ширину «слоя видимости» в этом направлении. Поэтому направление на лоцируемый объект  $\theta_{\text{ц}}$  можно однозначно определить выражением

$$\theta_{\text{ц}} = \theta_{\text{пр}}(t_3 + A_{(\Delta t(\theta_{\text{ц}}))}) - \frac{\theta_0}{2}, \quad (6)$$

где

$$A_{(\Delta t(\theta_{\text{ц}}))} = \begin{cases} \Delta t(\theta_{\text{ц}}), \Delta t(\theta_{\text{ц}}) \geq 0, \\ 0, \Delta t(\theta_{\text{ц}}) < 0. \end{cases} \quad (7)$$

Выражение (6) можно преобразовать к виду

$$A_{(\Delta t(\theta_{\text{ц}}))} = t_{\text{пр}}\left(\theta_{\text{ц}} + \frac{\theta_0}{2}\right) - t_3,$$

т.е. для определения направления на лоцируемый объект  $\theta_{\text{ц}}$  необходимо решить алгебраическое уравнение относительно  $\theta_{\text{ц}}$

$$t_{\text{изл}}\left(\theta_{\text{ц}} - \frac{\theta_0}{2}\right) - t_{\text{изл}}\left(\theta_{\text{ц}} + \frac{\theta_0}{2}\right) - t_{\text{пр}}\left(\theta_{\text{ц}} - \frac{\theta_0}{2}\right) + t_3 = 0$$

при условии

$$\tau_{\text{пр}}(\theta_{\text{ц}}) - \tau_{\text{изл}}(\theta_{\text{ц}}) \geq 0.$$

Определение обобщённой угловой координаты  $\theta_{\text{ц}}$  согласно алгоритму, (6) позволяет устраниТЬ методические ошибки измерений  $\Delta\theta_1$  и  $\Delta\theta_2$ , возникающие соответственно из-за неопределенности расположения объекта точечной структуры внутри формируемого слоя видимости по дальности  $\Delta D$  и не учёта отличия законов сверхсканирования при излучении  $\theta_{\text{изл}}(t)$  и при приёме  $\theta_{\text{пр}}(t)$  сигналов

$$\Delta\theta_2 = \frac{[\theta_{\text{пр}}(t_3 + \Delta t(\theta_{\text{ц}})) - \theta_{\text{пр}}(t_3)]A_{(\Delta t(\theta_{\text{ц}}))}}{\Delta t(\theta_{\text{ц}})}. \quad (8)$$

Определение дальности  $R_{\text{ц}}$  известным способом с учётом (6), можно однозначно представить выражением

$$R_{\text{ц}} = \frac{c}{2} \left[ t_3 - A_{(\Delta t(\theta_{\text{ц}}))} + t_j \right]. \quad (9)$$

Таким образом, решение выражений (6) и (9) соответствует математической модели функционирования РЛСО с использованием метода сверхсканирования в режиме местоопределения объекта вторжения.

#### Оценка точностных характеристик математической модели функционирования РЛСО с использованием метода сверхсканирования в режиме местоопределения объекта вторжения

Суммарная квадратическая погрешность  $\Delta\theta_c$  традиционных методов измерений угловых координат при сверхбыстром сканировании определяется выражением [8]:

$$\Delta\theta_c = \sqrt{\Delta\theta_1^2 + \Delta\theta_2^2}, \quad (10)$$

где  $\Delta\theta_1$  и  $\Delta\theta_2$ , соответственно, описываются выражениями (1) и (8).

При линейном законе сканирования луча антенны на излучение импульса

$$\theta_{\text{изл}}(t) = \theta_{\text{н}} + \theta_{\text{обз}} \frac{t}{\tau_{\text{изл}}}$$

и при квадратическом законе сканирования луча антенны при приёме отражённого сигнала

$$\theta_{\text{пр}}(t) = \theta_{\text{н}} + \theta_{\text{обз}} \left( \frac{t}{\tau_{\text{изл}}} \right)^2$$

для случая совпадения законов качания луча антенны в заданном секторе обзора  $[\theta_{\text{н}}, \theta_{\text{н}} + \theta_{\text{обз}}]$  на излучение  $\tau_{\text{изл}}$  импульса и прием  $\tau_{\text{пр}}$  отражённого сигнала

$$\tau_{\text{изл}} \equiv \tau_{\text{пр}} \equiv \tau_{\text{обз}}, \theta_{\text{н}} \equiv 0$$

методическая погрешность измерений угловых координат  $\Delta\theta_1$  (1) из-за неопределенности расположения объекта точечной структуры внутри формируемого слоя видимости по дальности  $\Delta D$  будет определяться выражением

$$\Delta\theta_1 = \theta_{\text{пр}} \left( t_{\text{пр}} \left( \theta_{\text{ц}} - \frac{\theta_0}{2} \right) + \frac{2\Delta D}{c} \right) + \frac{\theta_0}{2} - \theta_{\text{ц}}$$

$$\text{где } \Delta D = \frac{[\tau_{\text{пр}}(\theta_{\text{ц}}) - A_{(\Delta t(\theta_{\text{ц}}))}]c}{2}$$

методическая погрешность измерений угловых координат  $\Delta\theta_2$  (8) не учёта отличия законов сверхсканирования луча антенны на излучение  $\theta_{\text{изл}}(t)$  и приём  $\theta_{\text{пр}}(t)$  сигналов сигнала будет определяться выражением

$$\Delta\theta_2 = \theta_{\text{обз}} \frac{\Delta t(\theta_{\text{ц}})(2t_3 + \Delta t(\theta_{\text{ц}}))A_{(x)}}{\tau_{\text{обз}}^2}, \quad (12)$$

где

$$x = \sqrt{(\theta_{\text{ц}} - \theta_{\text{н}} + \theta_0/2)/\theta_{\text{обз}}} - t_3/\tau_{\text{обз}}. \quad (13)$$

В условиях данного случая нормированные распределения методических ошибок измерений  $\Delta\theta_1$  и  $\Delta\theta_2$ , а также их суммарная квадратическая погрешность  $\Delta\theta_c$  приведены на рис.3 для случая  $\theta_0/\theta_{\text{обз}} = 0,1$ .

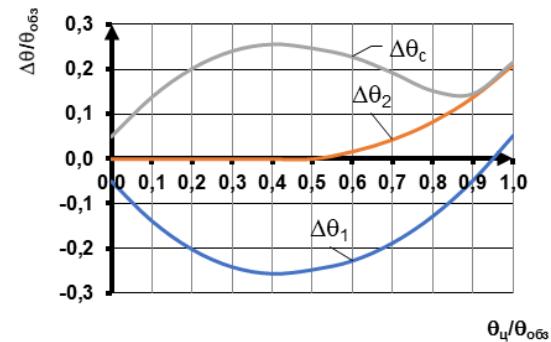


Рис. 3. Графики погрешностей измерений местаопределения цели традиционными методами

Из графиков видно, что потенциальная точность, характеризуемая суммарной квадратической погрешностью измерения угловых координат  $\Delta\theta_c$  при местоопределении лоцируемого объекта вторжения (точечной структуры) в РЛСО с использованием метода сверхсканирования может быть увеличена за счёт учёта различия законов сканирования луча антенны при излучении и приеме сигналов в секторе обзора, и местоположения по дальности внутри формируемого слоя видимости.

## Заключение

Использование геометрических параметров (длины траектории распространения и углового направления на излучатель), присутствующих в отражённых от объекта радиоволнах приводит к существенному увеличению информативности процесса обнаружения объекта вторжения. Данный факт свидетельствует о том, что предложенная математическая модель местоопределения объекта

вторжения РЛСО со сверхбыстрым сканированием луча антенны позволяет повысить потенциальную точность измерения параметров местоположения лоцируемого объекта по сравнению с известными способами. Следствием практической реализации предложенной математической модели ожидается повышение эффективности систем безопасности и обеспечение надёжной защиты объектов транспортной инфраструктуры.

## Литература

1. Ольшанский В.В., Лутков С. А., Мартемьянов С.В., Меньшенина Е.А. Формирование необходимой конфигурации зоны обнаружения радиолокационным средством со сверхсканированием на примере участка порта Новороссийск. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4 (52). С. 162-167.
2. Боран-Кешишьян А.Л., Попов В.В., Кондратьев С.И. Отдельные математические модели, описывающие радиотракт и ЭМС множества взаимодействующих радиосредств в береговом сегменте АПК е-навигации. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1 (41). С. 170-175.
3. Методы и средства повышения эффективности систем охраны объектов РВСН: Научно-методические материалы; под ред. В.Д. Михайленко. М.: МО СССР, 1985. 104 с.
4. Бакулов П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2004, 320 с.
5. Гинзбург В.М. Формирование о обработка изображений в реальном времени. Методы быстрого сканирования. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
6. Зырянов Ю.Т. Основы радиотехнических систем. Учебное пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. 144 с.
7. Способ измерения дальности до объекта. пат. 2101726. Рос. Федерация. № 5037494/09; заявл. 14.04.92; опубл. 10.01.98, Бюл. №1. 11 с.
8. Способ измерения угловых координат в системах со сверхсканированием. пат. 2093855. Рос. Федерация. № 94023757/09; заявл. 23.06.94; опубл. 20.10.97, Бюл. №29. 12 с.
9. Часнык К. А. Теоретические основы формирования и измерения характеристик волновых пучков при сверхсканировании: диссертация ... доктора физико-математических наук: 01.04.03. Ростов-на-Дону, 2000. 357 с.

## References

1. Ol'shanskiy V.V., Lutkov S. A., Martem'yanov S.V., Men'shenina E.A. Formirovanie neobkhodimoy konfiguratsii zony obnaruzheniya radiolokatsionnym sredstvom so sverkhskanirovaniem na primere uchastka porta Novorossiysk [Formation of coverage of the detection zone by radar methods with superscanning in the territory of the port of Novorossiysk]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 4 (52). S. 162-167.
2. Boran-Keshish'yan A.L., Popov V.V., Kondrat'ev S.I. Otdel'nye matematicheskie modeli, opisyvayushchie radiotrakt i EMS mnozhestva vzaimodejstvuyushchih radiosredstv v beregovom segmente APK e-navigacii. [Separate mathematical models describing the radio path and the EMC of a set of interacting radio means in the coastal segment of the agroindustrial complex of e-navigation]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 3-1 (41). S. 170-175.
3. Metody i sredstva povysheniya effektivnosti sistem okhrany obyektov RVSN: Nauchno-metodicheskiye materialy; pod red. V.D. Mikhaylenko [Methods and means of improving the efficiency of the systems of protection of objects of the strategic missile forces]. M.: MO SSSR. 1985. 104 s.
4. Bakulev P.A. Radiolokatsionnye sistemy [Radar systems]. Uchebnik dlya vuzov. M.: Radiotekhnika, 2004, 320 s.
5. Ginzburg V.M. Formirovaniye o obrabotka izobrazheniy v realnom vremeni. Metody bystrogo skanirovaniya [Real-time image generation and processing. Quick scan methods]. M.: Radio i svyaz. 1986. 232 s.
6. Zyrjanov Yu.T. Osnovy radiotekhnicheskikh system [Fundamentals of radio engineering systems]. Uchebnoe posobie. Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2011. 144 s.
7. Sposob izmereniya dal'nosti do ob'ekta [A method for measuring the distance to an object]. pat. 2101726. Ros. Federatsiya. № 5037494/09; zayavl. 14.04.92; opubl. 10.01.98, Byul. №1. 11 s.
8. Sposob izmereniya uglovykh koordinat v sistemakh so sverkhskanirovaniyem [Method for measuring angular coordinates in superscan systems]. pat. 2 093 855. Ros. Federatsiya. № 94023757/09; zayavl. 23.06.94; opubl. 20.10.97. Byul. №29. 12 s.
9. Chasnyk K. A. Teoreticheskie osnovy formirovaniya i izmereniya kharakteristik volnovykh puchkov pri sverkhskanirovaniyu [Theoretical foundations for the formation and measurement of the characteristics of wave beams during superscanning]: dissertatsiya ... doktora fiziko-matematicheskikh nauk: 01.04.03. Rostov-na-Donu, 2000. 357 s.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Владимир Владимирович Ольшанский**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики, естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин, Институт водного транспорта имени Г.Я. Седова филиал ФГБОУ ВО «Государственный Морской Университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 344006, Ростов-на-Дону, ул. Седова, 8, e-mail: olshanskiy@iwtshedov.ru

**Сергей Васильевич Мартемьянов**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой математики, естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин, Институт водного транспорта имени Г.Я. Седова филиал ФГБОУ ВО «Государственный Морской Университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 344006, Ростов-на-Дону, ул. Седова, 8, e-mail: martemjanov@iwtshedov.ru

**Наталья Юрьевна Сафонцева**, доктор педагогических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математики, естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин, Институт водного транспорта имени Г.Я. Седова – филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 344006, Ростов-на-Дону, ул. Седова, 8, e-mail: safontseva@iwtshedov.ru

**Виталий Борисович Гунько**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационного обеспечения органов внутренних дел, Ростовский юридический институт МВД России, 344015, Ростов-на-Дону, ул. Еременко, 83, e-mail: gunko.56@inbox.ru

**Vladimir V. Olshanskiy**, Ph. D. (Eng), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Mathematics, Natural Science Subjects and General Professional Modules, Sedov Water Transport Institute branch of the Admiral Ushakov Maritime State University, Rostov-on-Don, ul. Sedova, 8, 344006, Russian Federation, e-mail: olshanskiy@iwtshedov.ru

**Sergei V. Martemyanov**, Ph. D. (Eng), Assistant Professor, Head of the Department of Mathematics, Natural Science Subjects and General Professional Modules, Sedov Water Transport Institute branch of the Admiral Ushakov Maritime State University, Rostov-on-Don, ul. Sedova, 8, 344006, Russian Federation, e-mail: martemjanov@iwtshedov.ru

**Natalia Yu. Safontseva**, Dr. Sci. (Edu), Ph.D. (Phys & Math), Professor, Professor of the Department of Mathematics, Natural Sciences Subjects and General Professional Modules, Sedov Water Transport Institute, the branch of Ushakov State Maritime University (Rostov-on-Don, Russia), 8, Sedov St., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation, e-mail: safontseva@iwtshedov.ru

**Vitaly B. Gunko**, Ph. D. (Eng), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Information Support of Internal Affairs Bodies, Rostov Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Rostov-on-Don, Russia), 83, Eremenko St., Rostov-on-Don, 344015, Russian Federation, e-mail: gunko.56@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022.

**Научная статья**

УДК 004.942: 504.4.054

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.034>

## **Влияние гидроморфологических особенностей речного русла на характер распределения шлейфа загрязнения нефтью при авариях судов**

О.Л. Домнина<sup>1</sup> o-domnina@yandex.ru, И.В. Липатов<sup>1</sup>i\_lipatov@mail.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация.** Аварии сухогрузных судов могут приводить к возникновению экологических ущербов. При этом экологические последствия могут быть вызваны как попаданием груза в речное русло, так и топлива из расходных топливных баков. Данная работа является продолжением работ авторов, связанных с распространением загрязнений от транспортных происшествий на внутренних водных путях. Для создания максимально оптимального алгоритма предотвращения последствий таких аварий, необходимо знание сценария распространения загрязнения с учетом гидрологических особенностей отдельных речных участков. Особенно такой процесс моделирования может быть актуален для участков с высоким риском, при разработке мероприятий по защите водозаборных сооружений, особо охраняемых территорий и других случаях. В данной работе был выбран участок в районе 894 -900 км р. Волги. Моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса Flow Vision. В статье представлен математический аппарат для описания процессов моделирования кинематических характеристик движения речного потока и его характеристик, сформирована твердотельная модель исследуемого участка, выполнено моделирование распространения загрязнения топливом при посадке судна на мель и полученные результаты визуализированы.

**Ключевые слова:** транспортные происшествия и аварии судов; моделирование загрязнения; гидрологические особенности участка; водный транспорт

**Благодарности:** авторы выражают благодарность ректору университета за представление программного обеспечения для проведения расчетов.

**Для цитирования:** Домнина О.Л., Липатов И.В., Моделирование процессов распространения топлива при аварии сухогрузных судов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 258—268.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.034>

## **The Influence of Hydro morphological Features of the River Channel on the Distribution of the Oil Pollution Plume during Ship Accidents**

Olga L. Domnina<sup>1</sup> o-domnina@yandex.ru, Igor V. Lipatov<sup>1</sup>i\_lipatov@mail.ru

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Russian Federation

**Abstract.** Dry cargo ship accidents can cause environmental damage. At the same time, environmental consequences can be caused both by the ingress of cargo into the river channel and fuel from expendable fuel tanks. This work is a continuation of the authors' work related to the spread of pollution from traffic accidents on inland waterways. To create the most optimal algorithm for preventing the consequences of such accidents, it is necessary to know the scenario for the spread of pollution, considering the hydrological characteristics of individual river sections. Especially such a modeling process can be relevant for high-risk areas, when developing measures to protect water intake facilities, specially protected areas, and in other cases. In this work, a site was selected in the region of 894 -900 km of the river. Volga. The simulation was carried out using the Flow Vision software package. The article presents a mathematical apparatus for describing the processes of modeling the kinematic characteristics of the movement of a river flow and its characteristics, a solid model of the study area is formed, the simulation of the spread of fuel pollution during a grounding of a vessel is performed, and the results are visualized.

**Keywords:** transport accidents and ship accidents; pollution modeling; hydrological features of the site; water transport

**Acknowledgments:** the authors express their gratitude to the rector of the university for presenting the software for performing calculations.

**For citation:** Olga L. Domnina, Igor V. Lipatov, The Influence of Hydro morphological Features of the River Channel on the Distribution of the Oil Pollution Plume during Ship Accidents, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 258—268.

### **Введение**

Следствиями различных аварий судов являются химическое загрязнение водных ресурсов и прилегающих территорий [1 – 4]. Для прогнозирования возможных экологических последствий таких аварий могут использоваться как нормативные, так и численные методы, опирающиеся на математическое моделирование.

Вторые особенно актуальны при разработке мероприятий по защите водозаборных сооружений; особо охраняемых территорий; в районе расположения атомных электростанций и других случаях [5].

Для создания максимально оптимального алгоритма предотвращения последствий таких аварий, необходимо знание сценария и полная картина негативного развития техногенной аварии.

Как показывает практика, эти аварии имеют крайне нелинейный характер, и их воспроизведимость имеет почти нулевую вероятность. Еще хуже обстоит дело при попытке сбора статистики и систематизации негативного опыта, так как в этом случае мы имеем дело с «черным ящиком».

Одним из хорошо зарекомендовавших себя инструментов численного прогнозирования при изучении подобных техногенных аварий и создания систем противодействия им, является компьютерное моделирование этих сложных процессов. С одной стороны, такой подход позволяет смоделировать любое сочетание внешних факторов и проанализировать отклик экосистемы на воздействие. С другой стороны, это дает возможность исследователю отследить динамику развития процесса в полном объеме при любом сценарии, и тем самым наработать максимально адекватные мероприятия по минимизации ущерба для окружающей среды.

Вопросам моделирования распространения примесей посвящены ряд работ [6 – 15], но все они в основном, посвящены моделированию разливов нефти на море или на внутренних водных путях [16 – 18]. Моделированию распространения загрязнения сухих грузов на внутренних водных путях уделено недостаточное внимание.

Данное исследование является логическим продолжением более ранней работы, выполненной с участием авторов [5], устанавливающей наиболее аварийные участки в Волжском бассейне по уровню экологического риска.

С другой стороны, данное исследование является начальным этапом прогнозирования экологических последствий в результате аварий с сухогрузными судами на внутренних водных путях с помощью численных методов.

Целью данной работы является математическое моделирование процессов распространения топлива в границах одного из участков с высоким уровнем экологического риска в Волжском бассейне.

Для достижения этой цели авторами были сформулированы следующие задачи:

- обосновать выбор участка для моделирования;
- выбор математического аппарата для описания процессов турбулентности моделирования кинематических характеристик движения речного потока и его характеристик;
- исследование процесса распространения топлива в водном потоке;
- создание геометрической модели выбранного речного участка;
- формирование поверхности дна реки на выбранном участке;
- формирование твердотельной модели исследуемого участка;
- выполнение расчетов и моделирование поведения исследуемого участка при аварии;
- визуализация полученных результатов.

### **Материалы и методы**

Для выполнения процессов моделирования на основе проведенных ранее исследований [12] был выбран участок с умеренным риском в районе 894-900 км в районе Нижнего Новгорода (рис. 1).

Территориально он простирается от Сормовского района г. Н. Новгорода до Борского моста. С точки зрения морфологии этот участок включает в себя Верхний, Средний и Нижний Ревятские перекаты и завершается в низовьях течения в створе Борского моста.



**Рис.1. Результаты промеров участка 894-900 км реки Волги**

Особенностью этого участка является крайне активные турбулентные процессы, сопровождающие движение речного потока. За счёт специфических турбулентных процессов, протекающих на данном участке, формируются специфические колебания воздушной среды в прибрежной области. Проявлением этих колебаний становится устойчивый звуковой фон, который в тихую погоду воспринимается как рев медведя, что и дало историческое название перекатам. Другим проявлением особенностей турбулентной структуры течения на данном участке является активный русловой процесс, наблюдаемый на данном участке. В течении навигации преобладающими деформациями являются то боковые, то донные. Помимо этого, из-за продольных колебаний водной среды, формируются активные турбулентные зоны с вертикальной осью вращения. В результате на участке то появляются, то исчезают боковые области локальной циркуляции потока, которые коренным образом меняют кинематическую структуру потока на участке. Такие активные русловые процессы требуют существенных дноуглубительных работ для поддержания судоходных глубин и частой корректировки лоционных аспектов правил плавания.

Кроме того, специфика гидрологических условий, по всей вероятности, сказалась на повышенной аварийности этого участка, о чем свидетельствуют результаты, полученные в написанной ранее работе [5].

Отправной точкой для создания компьютерных математических моделей стало решение полной системы гидродинамических уравнений Навье-Стокса [6]:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}; \\ \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}; \\ \frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) &= g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}; \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

где:  $V_x, V_y, V_z$  – компоненты скоростей в проекции на соответствующую ось;

$P$  – давление в конкретной точке потока;

$\nu$  – эффективная вязкость, определяемая выражение.

$$\nu = \nu_k + \nu_t \quad (2)$$

где:  $\nu_k$  – кинематическая вязкость среды;

$\nu_t$  – турбулентная вязкость (коэффициент турбулентного обмена). Наиболее распространенным способом описания этой величины является  $k - \varepsilon$  подход. Согласно ему, величина коэффициента турбулентного обмена определяется по формуле:

$$\nu_t = c_p \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

где:  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;

$c_p$  – турбулентная константа среды;

$\varepsilon$  – диссипация турбулентной энергии.

Кинетическая энергия турбулентности и ее диссипация (рассеивание) в потоке, являются основными количественными характеристиками турбулизации речного потока, так как напрямую связаны с турбулентными касательными напряжениями в потоке. Для их численного определения возникает необходимость в дополнении системы уравнений (1), группой уравнений описывающих значения  $k$  и  $\varepsilon$  в области потока. Работа с  $k$  и  $\varepsilon$  более удобна чем прямой учет касательных турбулентных напряжений, так как позволяет существенно упростить натурные измерения и избавиться от ряда математических сложностей при численной реализации вычислительной процедуры. В частности, такой подход позволяет по отдельности считать турбулентность в ядре потока, где она полностью развивается. Параллельно с этим, для пристеночных областей, в случае необходимости, использовать соответствующие переходные законы-функции пристеночных переходов. Эти функции, несмотря на свою простоту, достаточно надежно обеспечивают устойчивость расчетной процедуры и получение достаточно точного результата.

Для описания турбулентности была применена зависимость кинетической энергии турбулентности  $k$  (4) и скорость диссипации кинетической энергии  $\varepsilon$  (5), описанные ранее в работе [19]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \tilde{u}_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) &= \\ \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \mu_t P_{NL} \end{aligned} \quad (4)$$

где:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t; \quad P = 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; \quad P_B = -\frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \rho \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$P_{NL} = -\frac{\rho}{\mu_t} \bar{u}_i \bar{u}'_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \left[ P - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

где  $\sigma_k$  – эмпирический коэффициент среды.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \tilde{u}_j \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) &= \\ C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[ \mu_t P - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_{NL} - & \quad (7) \\ - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_{NL} \end{aligned}$$

где  $\sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}$  и  $C_{\varepsilon 4}$  – эмпирические коэффициенты, чьи значения, взяты из источников [19].

Для моделирования поведения функции в переходной пристеночной зоне авторами был использован экспоненциальный профиль скорости Никурадзе [20] в виде функции нормального расстояния от перегородки:

$$u^+ = \begin{cases} u^+ = y^+, y^+ \leq y_m^+ \\ u^+ = A + \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y^+ - D^+}{B + CR^+} \right); y^+ > y_m^+ \end{cases} \quad (8)$$

где  $u^+$  –  $(u - uW)/u\tau$

$u$  – тангенциальная скорость жидкости;

$uW$  – скорость стенки ( $uW=0$ );

$u\tau$  –  $(\tau W/\rho)0.5$ ;

$\tau W$  – сдвиговое напряжение стенки;

$$y^+ = \rho C \mu 0.25 k 0.5 y / \mu; \quad (9)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент

$$D^+ = \rho C_p^{0.25} k^{0.5} \frac{D}{\mu} \quad (10)$$

$$R^+ = \rho C_p^{0.25} k^{0.5} \frac{y_0}{\mu} \quad (11)$$

Здесь  $A, B$  и  $C$  являются константами,

$D$  – толщина смещения;

$y_0$  – эквивалентная высота шероховатости.

Помимо моделирования кинематических характеристик движения речного потока и турбулентных характеристик ( $k$  и  $\varepsilon$ ), в процессе моделирования были определено нестационарное поле распространения концентраций ионородных примесей. Так как в данном случае был исследован случай распространения топлива в водном потоке, то для описания распространения последнего в воде авторы воспользовались формулами двух разнородных жидкостей. Т.е. на каждом временном шаге, свойства среды для каждой ячейки,

определялись как средневзвешенная от объемов жидкости, проходящих через ячейку транзитом. Так как в дальнейшем движение речного потока принималось изотермическим, то расчет был ограничен определением плотности среды и вязкости:

$$\rho = \frac{(\rho_1 * m_1 + \rho_2 * m_2)}{m_1 + m_2} \quad (12)$$

$$\nu = \frac{(v_1 * m_1 + v_2 * m_2)}{m_1 + m_2} \quad (13)$$

где  $\rho$  – плотность смеси в ячейке

$\rho_1, \rho_2$  – плотности воды и топлива соответственно

$v$  – вязкость среды в ячейке

$v_1, v_2$  – вязкость воды и керосина соответственно.

Для совместного решения системы описанных уравнений (1) - (13) авторы определились с расчетной областью потока, граничными и начальными условиями к задаче. В качестве исследовательского полигона выбор авторов остановился на состоянии данного участка в навигацию 2021 года при проектном уровне.

Для решения задачи были использованы достижения современных CAD/CAE пакетов. На первом CAD этапе была создана твердотельная виртуальная модель исследуемого участка. На втором CAE этапе твердотельная геометрическая модель была импортирована в расчетный CAE пакет, где по геометрической модели создается расчетная модель. При этом CAE этап реализуется в две ступени:

1. Препроцессор – импортируемую геометрическую модель разбивалась на расчетные ячейки, были заданы необходимые математические описания модели исследуемых физических процессов, выполнен расчет;

2. Пост процессор – с помощью набора функций полученные результаты были визуализированы и обработаны, проанализирована динамика развития исследуемого процесса.

### Результаты и обсуждение

Отправной точкой для создания геометрической CAD модели является съемка промерным комплексом, установленным на катере топографической информации о состоянии поверхности дна. Традиционно съемка осуществляется по галсам, длина которых определяется шириной между берегами реки и текущими глубинами (рис. 2). Последние определяют возможность подхода судна к берегам в данный момент, что напрямую влияет на ширину промерных галсов.

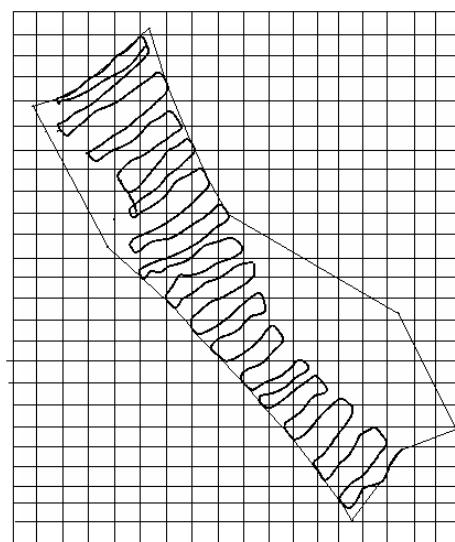


Рис.2. Промерные галсы и интерполяционная сетка

Одновременно со съемкой промерный комплекс производит отрисовку результатов промеров в виде карты изобат промеров. Фрагмент такой карты на перегоне между Верхним и Средним Ревятскими перекатами представлен на рис. 3.

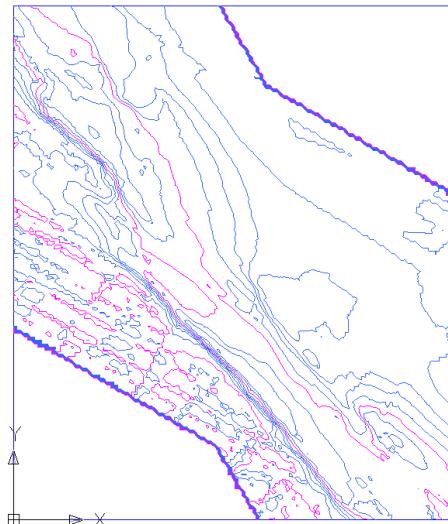
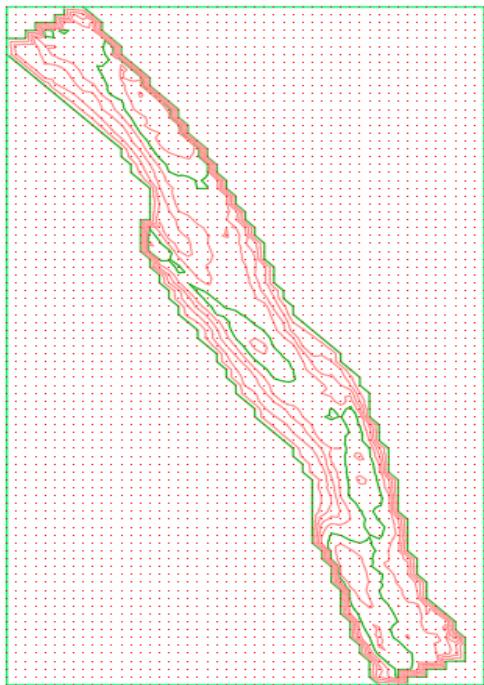


Рис.3. Фрагмент карты изобат с промеров на участке

Существенным недостатком съемки по галсам, является то, что плановое положение точек носит квазихаотичный порядок. Это становится непреодолимым препятствием при дальнейшей обработке данных, так как последующее корректное построение поверхности рельефной плоскости возможно только по опорным точкам, позиционированным с равномерным постоянным шагом по обоим осям. Учитывая данное обстоятельство, данные промеров были интерполированы на равномерную сетку, а затем в виде текстового файла экспортированы в геометрический пакет твердотельного моделирования.

Структурно пакет с импортируемыми данными представляет собой трехмерный массив данных, в котором опорные точки собраны по сечениям и упорядочены по ортогональной координате. Соответственно, третий столбец представляет собой глубину, полученную интерполяцией опорных данных.

После обработки данных полевых изысканий в промерном комплексе, наступил этап формирования геометрической модели исследуемого участка. На первом этапе в пакет твердотельного моделирования были загружены данные промеров Нижнего Ревятского переката (рис 4).



Внешние контуры перекатного участка имеют сложную форму, а опорная интерполяционная сетка строго ортогональный прямоугольный контур. Чтобы корректно свести два этих потока данных в тех областях, где плановое положение точки выходит за границы контура речного русла в качестве глубины была принята нулевая глубина. Впоследствии, при формировании поверхности дна реки, в областях «сухих» глубин была получена чисто горизонтальная поверхность (рис. 5).

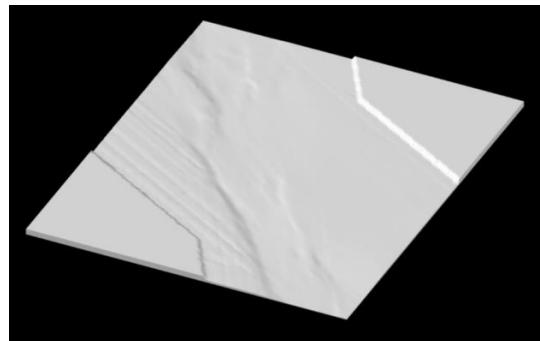


Рис.5. Фрагмент результата формирования рельефной поверхности дна между Верхним и Средним Ревятскими перекатами

После сборки всех участков (поверхность Верхнего, Среднего и Нижнего Ревятских перекатов), полученную поверхность рельефа дна трех перекатных участков была преобразована по ряду Булевых преобразований.

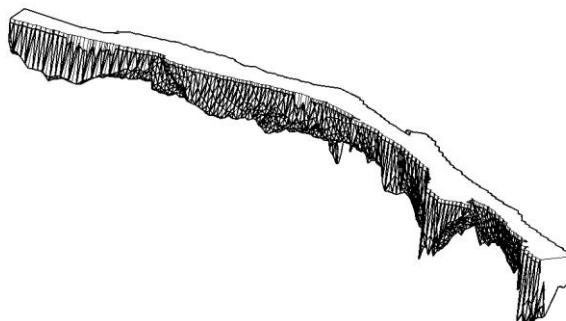
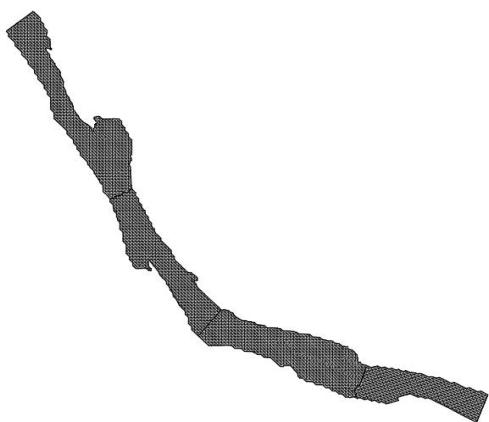
В этот комплекс вошло:

1. Создание внешнего прямоугольного контура относительно поверхности рельефа дна каждого перекатного участка;

2. Разделение прямоугольного контура на два тела с помощью поверхности рельефа дна;

3. Удаление нижнего тела и удаления от верхнего тела ряда излишних деталей.

В результате последовательного выполнения вышеописанного круга операций была сформирована твердотельная модель исследуемого участка (рис. 6)



Наличие твердотельной модели позволяет перейти от CAD-этапа математического моделирования к CAE. Как уже ранее указывалось, для качественного решения дифференциальных уравнений к сформированной геометрической модели исследуемого участка были приложены граничные условия. Учитывая специфику нашей

задачи, в расчетной области выделяется 5 граничных областей (рис. 7):

1. Входное сечение (область 1).
2. Область аварии и сброса топлива (область 2).
3. Дно речного участка (область 3).
4. Свободная поверхность (область 4).
5. Выходное сечение (область 5).

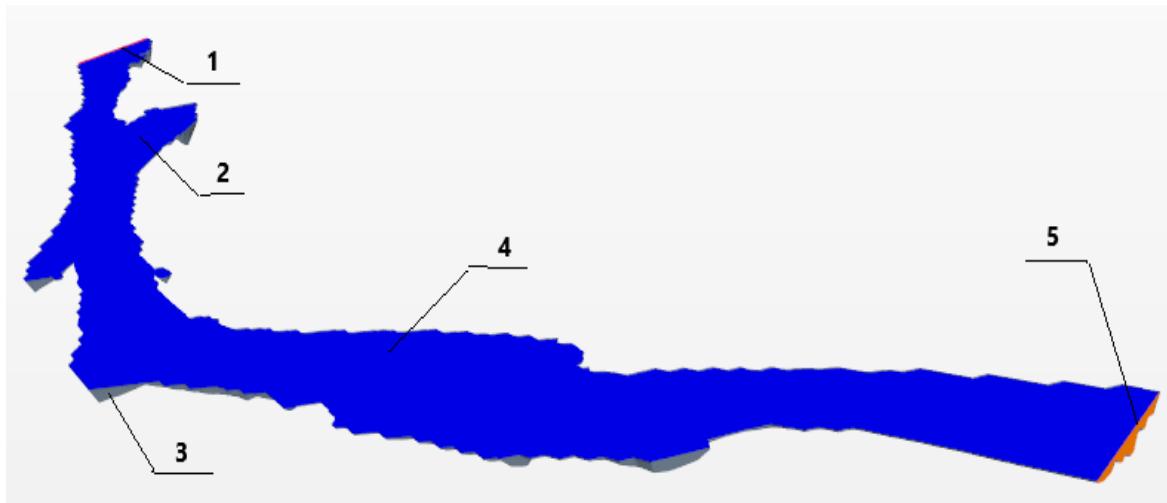


Рис.7. Границные области

В общем случае на всех граничных областях используются классические условия. Единственное что заслуживает особого внимания – это область 2 – точка попадания топлива в речной поток после того как судно получает пробоину и жидкость начинает вытекать. Так как реальное поле скоростей в потоке реки нам неизвестно, то решение будет реализовываться в два этапа:

Первый – начинается с момента, когда стоячий поток начинает разгоняться в границах расчетной области и разгоняется до квазистационарного состояния. Так как исследуемый участок характеризуется наличием большого количества турбулентных зон, то полной стабилизации потока в принципе не существует. Критерием окончания этого этапа будет момент, когда интегральные расходы воды в ряде контрольных сечений (входном, выходном, середине и двух промежуточных) сравняются в пределах 0.1 %. Естественно, из-за вращения турбулентных зон 100% равенства добиться невозможно, так как абсолютной стабильности речного потока в природе не существует. Как показали методические расчеты, продолжительность этого этапа составляет порядка 3000 секунд.

Второй этап - «разогрев» речного потока до квазистационарного состояния. При этом предполагается что в реку попадает содержимое объемом 10 куб метров (средний размер расходных баков).

Вытекание топлива в реку идет через гидравлически малое отверстие, погруженное на 2.5-3 метра от поверхности воды, так как чаще всего вызвано посадкой судна на мель. Естественно, график вытекания топлива в реку, начинается от нулевой величины и достигает максимума, а затем опять возвращается в ноль. Конечная точка графика наступает в тот момент, когда уровни в реке и в корпусе станут соизмеримо близкими и гидростатические давления уравновесят друг друга. С целью упрощения задачи, примем расход вытекания топлива из пробоины в корпусе постоянным. С учетом объема и средней скорости его вытекания, весь процесс займет порядка 250 секунд при среднем массовом расходе вытекания 30 кг/сек.

Результаты численного моделирования показаны на рис. 8.

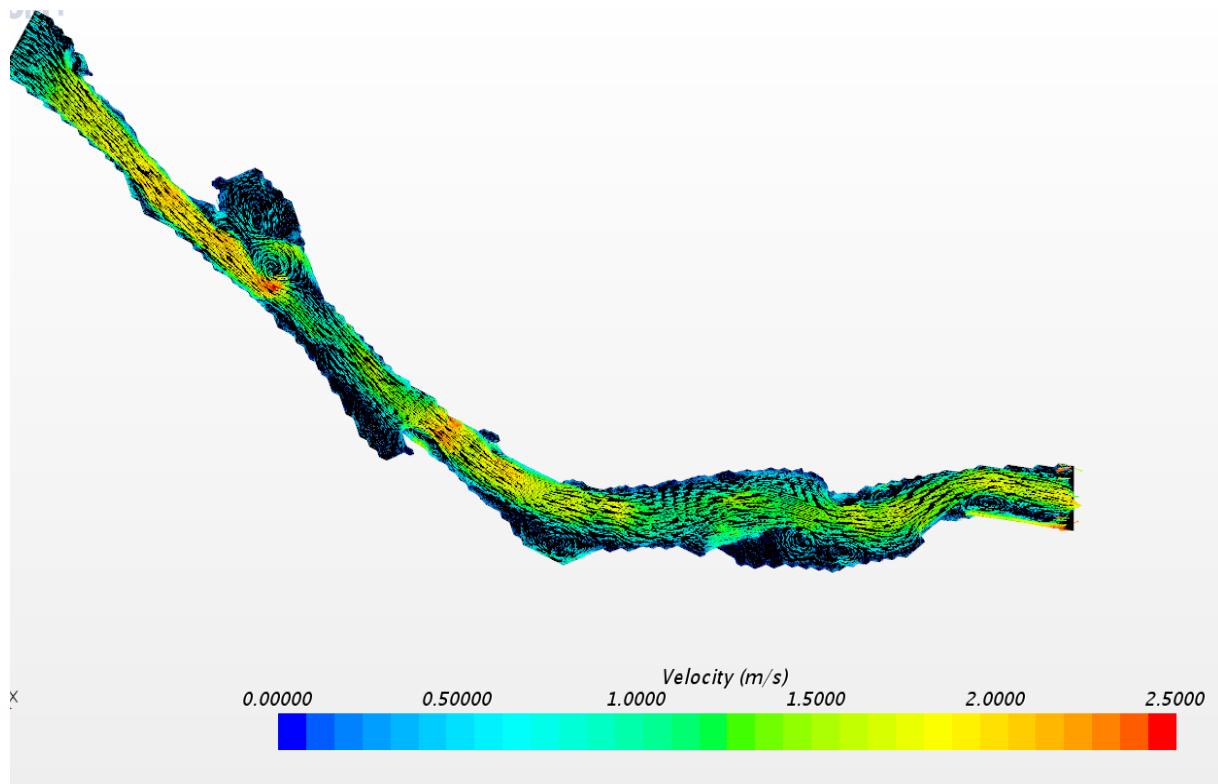


Рис.8. Кинематическая структура речного потока, определяющая распространение нефтепродукта из расходных топливных баков при аварии судна

Рис. 8 иллюстрирует векторную структуру потока и значения поля скоростей на свободной поверхности на момент времени 3000 с, когда поток достигнет стабильного состояния.

Рассмотрим распространение загрязняющего вещества (нефтепродукта) при аварии судна на участке с учетом гидроморфологических особенностей русла на нем (рис. 9-13).

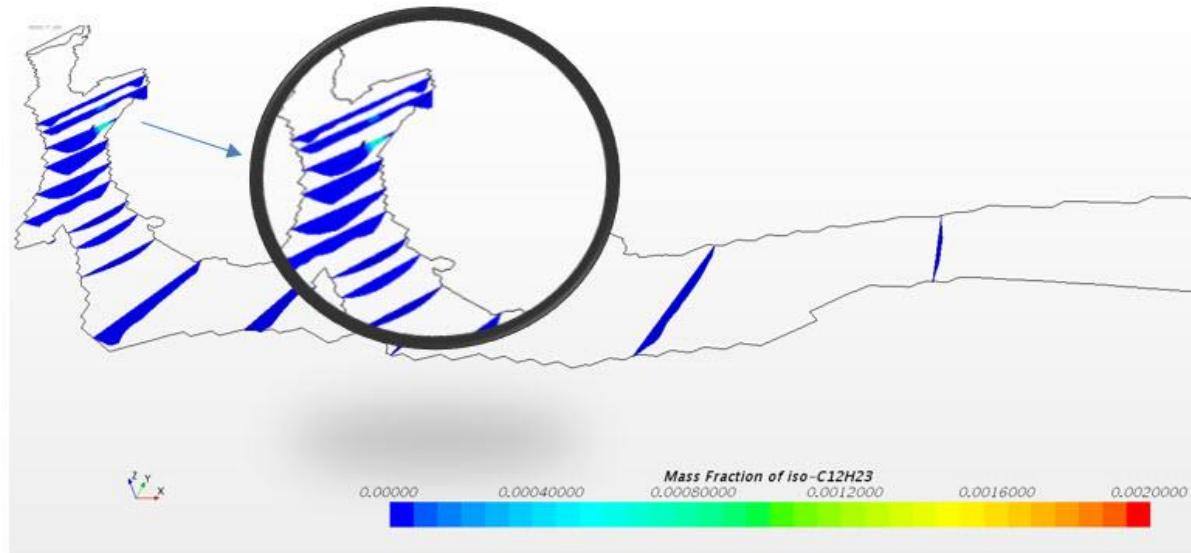


Рис.9. Распространение нефтепродукта при аварии судна (150 секунд после аварии)

Как видно из рис.9 в начальный момент аварии судна начинается попадание топлива в речное русло. За счет вращения в застойной турбулентной зоне поток начинает переносить большую часть

топлива по течению, но при этом часть примесей переносится вверх за счет вращения в турбулентном вальце.

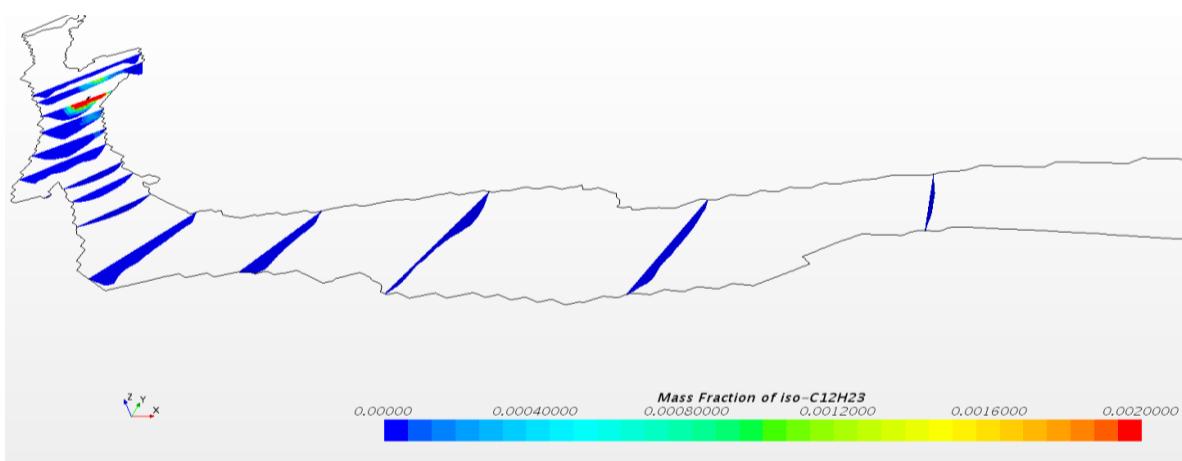


Рис.10. Распространение нефтепродукта при аварии судна (300 секунд после аварии)

К 300 секундам шлейф мутности начинает заполнять турбулентную рециркуляционную зону.

Как видно из рис. 10, к этому моменту в ряде областей ПДК больше 0,2%.

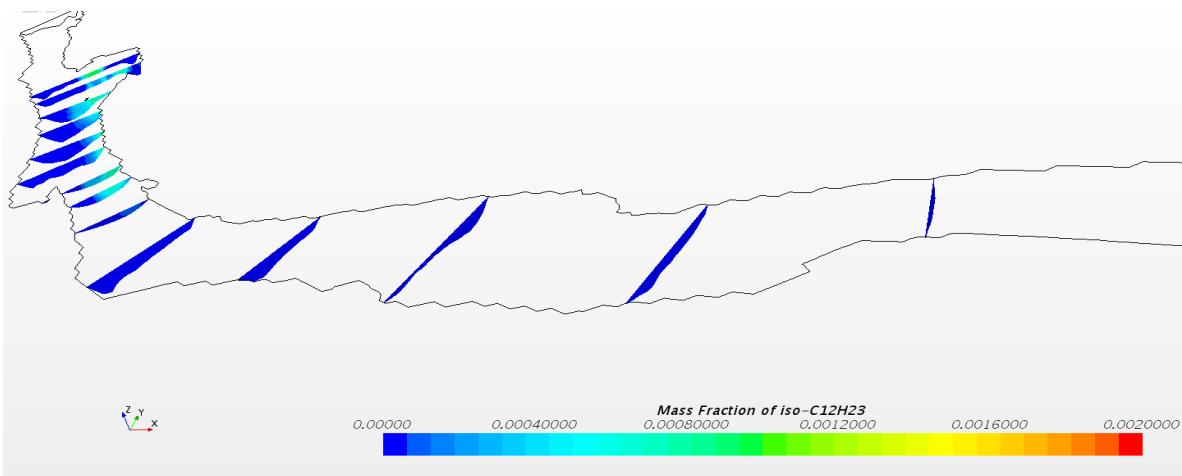


Рис.11. Распространение нефтепродукта при аварии судна (400 секунд после аварии)

За счет вращения в турбулентном вихре (рис.11) топливные примеси более равномерно распределяются по объему и более интенсивно

смещаются вниз по течению. Характерным является то, что ПДК снижаются до 0,04%.

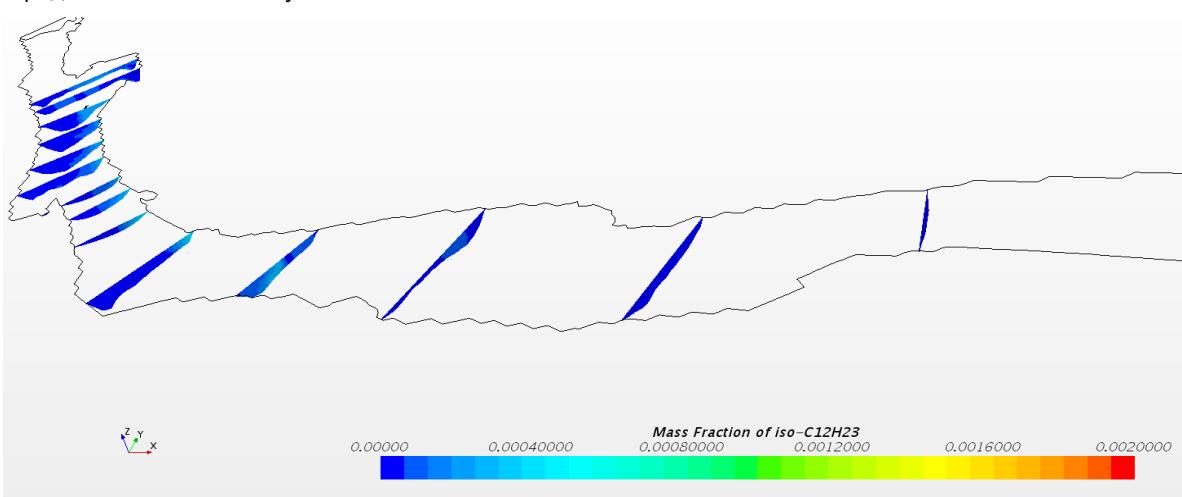


Рис.12. Распространение нефтепродукта при аварии судна (550 секунд после аварии)

К 550 (рис. 12) секундам поток шлейфа практически полностью заполнит пространство между Верхним и Нижним Ревятскими перекатами. При этом основной шлейф загрязнения будет смещаться к левому берегу в область между Средним и Нижним Ревятскими перекатами. Зона

максимального загрязнения имеет тенденцию перехода от левого берега к правому, что связано с изменением динамики оси потока (стремнин) на 60 градусов. При этом ПДК падают в два раза до 0,02%.

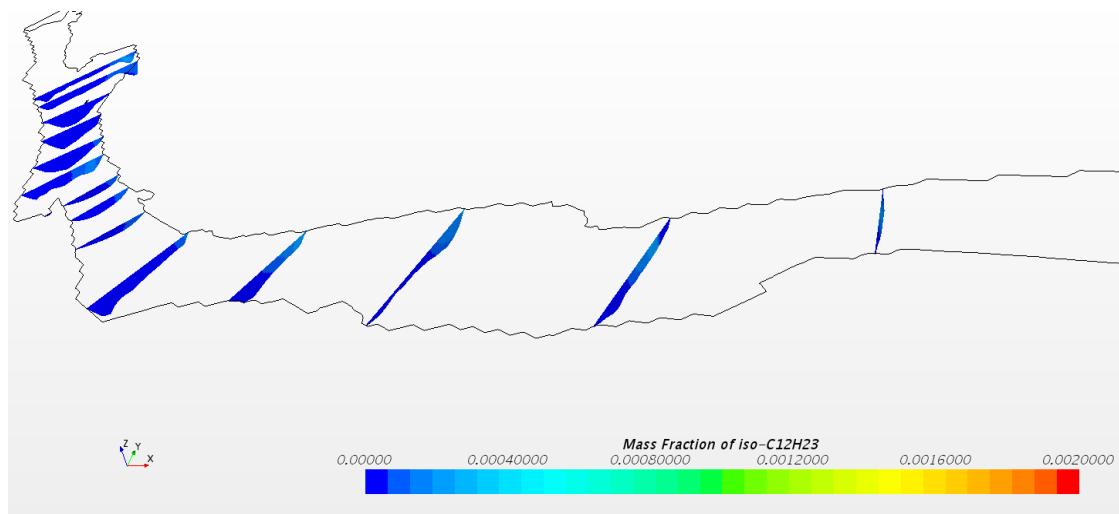


Рис.13. Распространение нефтепродукта при аварии судна (750 секунд после аварии)

К 750 секундам (рис.13) практически все топливные примеси конвективно переносятся в конец участка, и концентрация ПДК устремляется к 0. Исключением является верхняя часть затонской емкости, где часть топлива вовлекается в турбулентный вихрь речного потока и остается на месте, не перемещаясь вниз по течению.

Как видно из анализа динамики распространения загрязнения топливо не всегда перемещается вниз по течению и покидает загрязненный участок. При наличии гидроморфологических особенностей в русле (турбулентной зоне, затоне, застойной области и др.) часть загрязняющего вещества может оставаться в точке выброса и тем самым ухудшить экологическое состояние водоема на участке.

Подобный нетрадиционный вариант развития практически невозможно описать с помощью нормативных методов оценки экологического риска. Только использование информационных систем, базирующихся на математическом моделировании, позволяет учесть дополнительные

экологические риски и разработать комплекс мероприятий по защите отдельных объектов (например, водозаборных сооружений; особо охраняемых территорий; атомных электростанций).

### Заключение

Таким образом, авторами в данной работе были получены следующие результаты:

- показана возможность применения программного продукта Flow Vision для получения более полной картины распространения загрязнения при авариях судов на внутренних водных путях;
- выявлено влияние на распространение загрязнения таких факторов, как форма речного русла, скорость течения, гидроморфологические особенности аварийного участка.

Предметом дальнейших исследований авторов будет моделирование распространения удобрений и соли при попадании в речное русло при авариях сухогрузов.

### Литература

- 1 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. № 4 part 1, С. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
- 2 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.
- 3 Батанина Е.А., Домнина О.Л. Оценка возможного размера вреда при аварийных сбросах сыпучих грузов с судов// Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. №3 (53). С. 192-199
- 4 Решняк В.И Оценка уровня экологической опасности источников аварийных разливов нефти. Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 4 (97). С. 72-76.
- 5 Домнина О.Л. Оценка риска экологических последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами на примере Волжского бассейна// Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. №1 (55). С.187-193

- 6 Методология обеспечения защиты урбанизированных территорий от природных и техногенных негативных воздействий: монография Андрея М.Е., Гришина И.Н., Ежков А.Н., Ерискина Т.О., Зотов Д.И., и др., Нижний Новгород, 2013. 596 с.
- 7 Липатов И.В. Моделирование экологических проблем речных водоемов с использованием пакета STAR\_CD. САПР и графика. 2000. № 12. С. 106.
- 8 Creber, D.J. Koldenhof, Y. Frequency of spill model for area risk assessment of ship-source oil spills in Canadian waters, 40th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, c. 286-308 (2017)
- 9 Ebrahimi Baha; Ahmadi Salman; Chapi Kamran; AmjadiHazhir Risk assessment of water resources pollution from transporting of oil hazardous materials (Sanandaj-Marivan road, Kurdistan Province, Iran), Environmental science and pollution research international, Volume 27 Issue 28, p.35814-35827 (2020) doi:10.1007/s11356-020-09886-8
- 10 SajidZaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, Marine pollution bulletin, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
- 11 Helle Inari; MakinenJussi; NevalainenMaisa; AfenyoMawuli; VanhataloJarno. Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective, Environmental science & technology, Volume 54 Issue 4. p.2112-2121(2020) doi:10.1021/acs.est.9b07086
- 12 Liu Xin; GuoMingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; GuoJie; Tang Cheng; Hu Xiaoke; Wang Chuanyuan; Li Baoquan Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. Marine pollution bulletin, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
- 13 Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, Ocean & Coastal Management, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocemoaman.2020.105446
- 14 Aditya Rio Prabowo, Dong MyungBae Environmental risk of maritime territory subjected to accidental phenomena: Correlation of oil spill and ship grounding in the Exxon Valdez's case, Results in Engineering, 18 September, Volume 4, Article 100035, (2019) doi: 10.1016/j.rineng.2019.100035
- 15 Matthias Grote, Nicole Masurek, CarolinGräbsch, 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.
- 16 Пластиинин 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.
- 17 Шматкова Е.Ю., Пластиинин 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.
- 18 Липатов И.В., Пластиинин А.Е. Оценка гидродинамических условий при ликвидации разливов нефти. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 5 (27). С. 127-134.
- 19 Gutachten über dieseitliche Einleitung von Überschusswasserinden Einfahrtsbereich der Schleuse Nürnberg – технический отчет BAW. Автор Кастен Торенц, Липатов И.В. - Карлсруэ – Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) -Nr. 3.03.10043.00 – Dezember 2003.
- 20 Schlichting, H. "Boundary Layer Theory". 6th Edition, McGraw-Hill, New York. 1968.

#### References

1. 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. № 4 part 1, C. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
2. 2 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. №4-2 (46). C. 79-84.
3. Ekaterina A. Batanina, Olga L. Domnina Assessment of the possible amount of harm in case of emergency discharges of bulk cargo from ships// Marine intellectual technologies.. 2021. №3part 1. pp. 192-199
4. Reshnyak V. And Assessment of the level of environmental hazard of sources of emergency oil spills. Operation of sea transport. 2020. No. 4 (97). pp. 72-76.
5. Olga L. Domnina, Risk Assessment of Environmental Consequences from Transport Accidents with Dry Cargo Vessels on the Example of the Volga Basin. Marine intellectual technologies. 2022. № 1 (55) V.1.pp. 187-193.
6. Methodology of ensuring the protection of urbanized territories from natural and man-made negative impacts: monograph by Andree M.E., Grishina I.N., Yezhkov A.N., Yeriskina T.O., Zotov D.I., et al., Nizhny Novgorod, 2013. 596 p.
7. Lipatov I.V. Modeling of ecological problems of river reservoirs using the STAR\_CD package. CAD and graphics. 2000. No. 12. p. 106.
8. Creber, D.J. Koldenhof, Y. Frequency of spill model for area risk assessment of ship-source oil spills in Canadian waters, 40th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, c. 286-308 (2017)
9. 9.Ebrahimi Baha; Ahmadi Salman; Chapi Kamran; AmjadiHazhir Risk assessment of water resources pollution from transporting of oil hazardous materials (Sanandaj-Marivan road, Kurdistan Province, Iran), Environmental science and pollution research international, Volume 27 Issue 28, p.35814-35827 (2020) doi:10.1007/s11356-020-09886-8
10. SajidZaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, Marine pollution bulletin, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001

11. Helle Inari; MakinenJussi; NevalainenMaisa; AfenyoMawuli; VanhataloJarno. Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective, Environmental science & technology, Volume 54 Issue 4. p.2112-2121(2020) doi:10.1021/acs.est.9b07086
12. Liu Xin; GuoMingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; GuoJie; Tang Cheng; Hu Xiaoke; Wang Chuanyuan; Li Baoquan Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. Marine pollution bulletin, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
13. Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, Ocean & Coastal Management, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105446
14. Aditya Rio Prabowo, Dong MyungBae Environmental risk of maritime territory subjected to accidental phenomena: Correlation of oil spill and ship grounding in the Exxon Valdez's case, Results in Engineering, 18 September, Volume 4, Article 100035, (2019) doi: 10.1016/j.rineng.2019.100035
15. Matthias Grote, Nicole Masurek, CarolinGräbsch, 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.
16. Plastinin A.E. Assessment of pollution during oil spill on the water surface. Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of the Sea and River Fleet. 2013. №. 2. pp. 129-135.
17. Shmatkova E.Yu., Plastinin A.E., Baldenkow 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.
18. Lipatov I.V., Plastinin A.E. Assessment of hydrodynamic conditions during oil spill response. Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of the Sea and River Fleet. 2014. № 5 (27). pp. 127-134.
19. Gutachten über dieseitliche Einleitung von Überschusswasserinden Einfahrtsbereich der Schleuse Nürnberg – BAW Technical report. Author Kasten Torenz, Lipatov I.V. - Karlsruhe – Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) -Nr. 3.03.10043.00 – Dezember 2003.
20. Schlichting, H. "Boundary Layer Theory". 6th Edition, McGraw-Hill, New York. 1968.

#### ИНФОРМАЦИЯ О БАВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ольга Леонидовна Домнина**, кандидат технических наук, доцент, научный секретарь, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

**Игорь Викторович Липатов**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водных путей и гидро сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: i\_lipatov@mail.ru

**Olga L. Domnina**, Ph.D.(Eng), assistant professor, Scientific Secretary, Volga State University of Water Transport, Nesterovast., 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: o-domnina@yandex.ru

**Igor V. Lipatov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 603950, N. Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail:i\_lipatov@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 05.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.05.2022.

**Научная статья**

УДК 502.51(282.247.41):504.5:665.6

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.035>

## Оценка опасности и локализация пожаров разлияния нефтепродуктов на водных объектах

В.С. Наумов<sup>1</sup> [kaf\\_oospb@vsuwt.ru](mailto:kaf_oospb@vsuwt.ru), А.Е. Пластиинин<sup>1</sup> [plastininae@yandex.ru](mailto:plastininae@yandex.ru),

Н.И. Волкова<sup>1</sup> [volkova.ni@vsuwt.ru](mailto:volkova.ni@vsuwt.ru), А.Д. Шапошников<sup>1</sup> [leha.shaposhnikoff@yandex.ru](mailto:leha.shaposhnikoff@yandex.ru)

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы оценки опасности и выбора технологии локализации пожаров разлияния нефти и нефтепродуктов на водных объектах на основе прогнозирования движения нефтяного загрязнения путем совместного применения методов имитационного моделирования разливов нефти и математической статистики. Пожары разлияния сопровождаются значительным тепловым воздействием на окружающую среду и требуют разработки защитных мероприятий, направленных в первую очередь на локализацию процессов распространения опасных факторов. Целью работы является научное обоснование и разработка методики оценки опасности пожаров разлияния нефтепродуктов на водных объектах в границах отдельных Администраций бассейнов внутренних водных путей. Основными этапами предложенной методики являются: формирование базы данных по источникам разливов нефти для рассматриваемого бассейна внутренних водных путей; оценка влияния различных факторов на площадь нефтяного загрязнения; математическое прогнозирование разливов нефти с учетом всех значимых факторов; определение максимально возможной площади нефтяного загрязнения; расчет безопасного расстояния от центра пятна при реализации пожара разлияния; выбор метода локализации, расчет длины негорючих боновых заграждений. Авторами создана классификация источников разлива нефти в границах бассейна внутренних водных путей по уровню опасности при реализации пожара разлияния (на примере Волжского бассейна), обеспечивающая оценку безопасной дистанции и длины негорючих боновых заграждений. Для оперативного определения безопасным расстоянием при пожаре разлияния нефтепродуктов и площадью пятна. Полученные результаты применялись для разработки регионального (бассейнового) плана по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в границах Администрации Волжского бассейна внутренних водных путей и тренажерной подготовки персонала.

**Ключевые слова:** разлив нефти, пожар разлияния, безопасная дистанция, метод локализации, классификация источников разлива нефти, методика оценки опасности

**Благодарности:** авторы выражают благодарность Игорю Константиновичу Кузьмичеву за предоставление данных.

**Для цитирования:** Наумов В.С., Пластиинин А.Е., Волкова Н.И., Шапошников А.Д. Оценка опасности и локализация пожаров разлияния нефтепродуктов на водных объектах, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 269—278.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.035>

## Hazard assessment and localization of oil spill fires at water bodies

Viktor S. Naumov<sup>1</sup> [kaf\\_oospb@vsuwt.ru](mailto:kaf_oospb@vsuwt.ru), Andrey E. Plastinin<sup>1</sup> [plastininae@yandex.ru](mailto:plastininae@yandex.ru), Nadezhda I. Volkova<sup>1</sup> [volkova.ni@vsuwt.ru](mailto:volkova.ni@vsuwt.ru), Alexei D. Shaposhnikov<sup>1</sup> [leha.shaposhnikoff@yandex.ru](mailto:leha.shaposhnikoff@yandex.ru)

<sup>1</sup>Volga State University of Water Transport

**Abstract.** The article discusses the issues of hazard assessment and the choice of technology for localizing fires of oil and oil products spills on water bodies based on forecasting the movement of oil pollution through the joint application of oil spill simulation methods and mathematical statistics. Spill fires are accompanied by a significant thermal impact on the environment and require the development of protective measures aimed primarily at localizing the spread of dangerous factors. The aim of the work is the scientific substantiation and development of a methodology for assessing the risk of fires and oil spills on water bodies within the boundaries of individual Administrations of inland waterway basins. The main stages of the proposed methodology are: formation of a database on the sources of oil spills for the considered basin of inland waterways; assessment of the influence of various factors on the area of oil pollution; mathematical forecasting of oil spills taking into account all significant factors; determination of the maximum possible area of oil pollution; calculation of a safe distance from the center of the spot in the event of a spill fire; choice of localization method, calculation of the length of non-combustible booms. The authors created a classification of oil spill sources within the boundaries of the inland waterways basin according to the level of danger in the event of a spill fire (using the example of the Volga basin), which provides an assessment of the safe distance and length of non-combustible booms. In order to quickly determine the safe distance when installing booms, an equation was constructed between the safe distance in case of an oil spill fire and the slick area. The results obtained were used to develop a regional (basin) plan for the prevention and elimination of oil and oil products spills within the boundaries of the Administration of the Volga Inland Waterways Basin and simulator training of personnel.

**Keywords:** oil spill, spill fire, safe distance, containment method, classification of oil spill sources, hazard assessment methodology

**Acknowledgments:** the authors are grateful to Igor K. Kuzmichev for providing the data

**For citation:** Viktor S. Naumov, Andrey E. Plastinin, Nadezhda I. Volkova, Alexei D. Shaposhnikov, Hazard assessment and localization of oil spill fires at water bodies, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 269—278.

## Введение

При разливах нефти на водных объектах существует высокий уровень риска возгорания в силу действия физических свойств нефтепродуктов и случайных факторов окружающей среды. Кроме этого широко применяются технологии ликвидации разливов, предусматривающие контролируемое сжигание нефти. В обоих случаях необходимо предусматривать специальные мероприятия по предупреждению негативного воздействия опасных факторов пожара на персонал, население и окружающую среду [1 – 3]. Важнейшими вопросами, возникающими при разработке оперативных мероприятий по локализации и ликвидации таких разливов, является прогнозирование площади разлива, времени и места дислокации нефтяного загрязнения [4 – 6]. На основе полученных данных осуществляется выбор технологии локализации, определение безопасной дистанции и длины боновых заграждений. При решении указанных вопросов, особенно на региональном (бассейновом) уровне возникают трудности научно-методического характера, связанные с необходимостью учета большого количества факторов, определяющих параметры нефтяного загрязнения, и, следовательно, выбор технологии локализации.

Поэтому существует необходимость выполнения комплексных исследований для создания научно-методического обеспечения для решения выше описанных задач.

Среди научных публикаций, посвященных прогнозированию пожаров разлияния нефтепродуктов, прежде всего, следует выделить исследование температуры поверхности, высоты пламени и скорости горения сырой нефти, выполненное в Техническом университете Дании и Копенгагенском университете [1], в котором экспериментальные результаты сопоставлены с четырьмя моделями испарения многокомпонентных топлив. В данной работе алканы испытаны в качестве эталонных топлив с равномерным порядком испарения, при котором все компоненты испаряются одновременно. Как и ожидалось, эти виды нефтепродуктов показали устойчивое горение с почти постоянной температурой поверхности, высотой пламени и скоростью горения. Кроме того, возрастающий градиент концентрации от средней к тяжелой фракции в остатках горения показал, что испарение ограничено диффузией. Анализ баланса теплопередачи для сырых нефтей показал, что энергия, доступная для испарения, со временем уменьшалась из-за увеличения тепловых потерь, которые вызваны летучестью. Предположительно, более масштабные пожары могут преодолеть эти тепловые потери, поскольку они обычно имеют более высокие скорости горения, которые

увеличивают тепловую обратную связь с поверхностью топлива и, следовательно, могут привести к более высокой эффективности горения.

Последствия аварийных разливов нефти на водных путях для окружающей среды оценены в работе [2] учеными Технологического университета Хошимина, Университета транспорта Хошимина и Вьетнамского морского университета, в которой отмечена необходимость развития и повышения эффективности технологий локализации и ликвидации разливов нефти, для пожаров разлияния исследовано безопасное расстояние и площадь зоны горевшего нефтепродукта в условиях применения метода термического сжигания.

Одним из основных факторов, определяющим тяжесть последствий пожаров разлияния, является площадь нефтяного загрязнения, оценка которой выполняется с помощью программных комплексов. В целом ряде стран для этих целей применяется система PISCES II, которая получила широкое распространение в США, Словении, Южной Корее, Греции, Эстонии, Польше, Японии, Турции, Бразилии, Румынии, Кипре, Канаде, России и др. [7 – 9].

Ученые выше перечисленных стран пошли по пути создания на основе PISCES II географически ориентированных систем прогнозирования разливов нефти в различных районах Балтийского [10 – 12], Средиземного [13 – 15], Черного [16 – 18], Охотского [19] морей и др.

Выполненный обзор литературных источников подтвердил актуальность планируемых исследований и выявил отсутствие работ, связанных с оценкой последствий пожаров разлияния на бассейновом уровне.

Таким образом, целью работы является научное обоснование и разработка методики оценки опасности пожаров разлияния нефтепродуктов на водных объектах в границах отдельных Администраций внутренних водных путей.

## 1. Материалы и методы

Математическое моделирование сценариев разлива нефти выполнялось в программном продукте PISCES II.

В качестве источников разливов нефти рассматривались места проведения грузовых и бункерных операций, очаги аварийности транспортных судов в границах Волжского бассейна внутренних водных путей. В ходе моделирования определялась максимальная площадь нефтяного пятна и время ее достижения с момента разлива, разработаны соответствующие карты чрезвычайных ситуаций.

Примеры созданных карт чрезвычайных ситуаций на четыре часа с момента разлива показаны на рис. 1 – 4.



Рис. 1. Карта чрезвычайной ситуации при разливе на нефтеперевалочном рейде г. Волгореченск в паводковых условиях

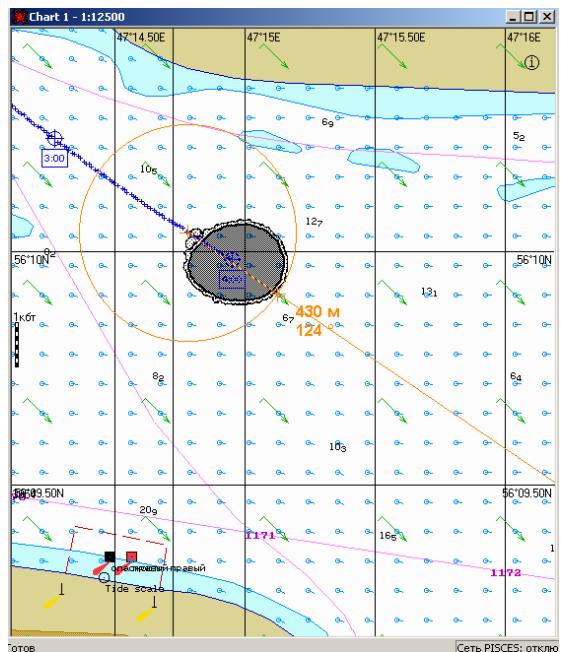


Рис. 3. Карта чрезвычайной ситуации при разливе на бункеровой станции г. Чебоксары в меженных условиях

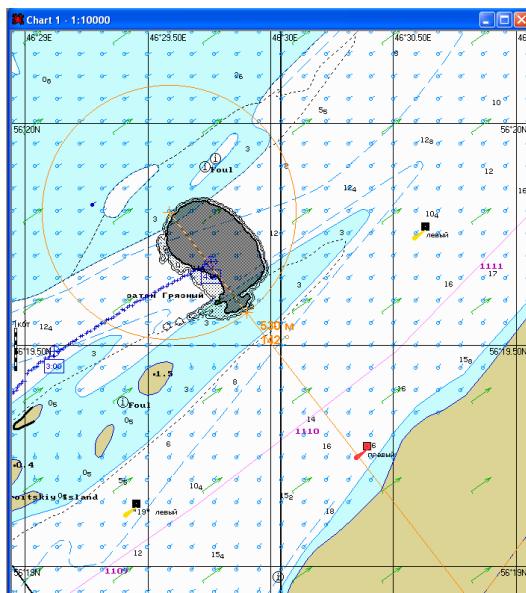


Рис. 2. Карта чрезвычайной ситуации при разливе на нефтеперевалочном рейде п. Великий Браг в меженных условиях

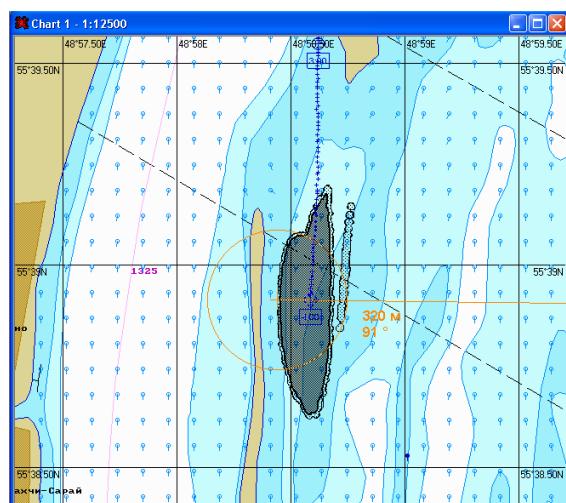


Рис. 4. Карта чрезвычайной ситуации при разливе на нефтеперевалочном рейде г. Казань в меженных условиях

В табл. 1 представлен фрагмент созданной базы данных для Волжского бассейна по источникам разлива с 528 по 1152 км реки Волги.

Таблица 1

**Фрагмент базы данных по максимальным площадям нефтяного пятна для Волжского бассейна**

№	Источник разлива	Дислокация, км	Масса разлива, т	Время, ч	Площадь пятна, м <sup>2</sup>	Гидрологический режим	Скорость течения, м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Очаг аварийности. Ярославль.	528,2	4500	1	316592	межень	0,7
2	Ярославль, рейд перевалки.	543,3-544	2500	4	255403	паводок	1,2

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
3	г. Волгореченск, нефтеналивной рейд.	633-635	1500	3	707964	паводок	0,85
4	Плес, нефтеналивной рейд.	661-662	12,5	1	12496	паводок	3,05
5	г. Городец, нефтеналивной рейд	847,0-848,0	2000	3	397402	межень	0,1
6	Очаг аварийности. п. Слобода	858,2	4500	4	260175	паводок	1,4
7	Очаг аварийности. г. Балахна	870	4500	2	165728	паводок	1,4
8	Нижегородский рейд (Печерский рейд)	896,3-898,3; 904,1-904,9; 907,0-907,5; 908,3-912,2(910)	2000	2	926437	межень	0,95
9	Нижегородский рейд г. Бор	912	170	1	74433	межень	0,83
10	Нижегородский рейд (Подновский рейд)	920,6-921,9 (921)	2000	3	737086	межень	0,95
11	Рейд города Кстово	934	170	3	118159	паводок	1,4
12	Нефтяной причал г. Кстово	935,5	170	4	115353	межень	0,83
13	Нефтеналивной рейд. П. Великий Враг	937,5-937,76	2000	4	1178845	межень	0,95
14	Нефтеналивной рейд. Д. Троицкий Посад	1107	240	4	155171	межень	0,06
15	Нефтяной причал. Г. Козьмодемьянск	1117,5	600	3	146232	межень	0,06
16	Нефтеналивной рейд, п. Вурнары	1151-1152	800	1	93919	межень	0,06

Для оценки безопасных расстояний от центра пятна при реализации сценария «пожар разлия» применялся приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 года № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».

## 2. Результаты и обсуждение

На основе созданной базы данных по максимальным площадям нефтяного пятна для Волжского бассейна и методики расчета

интенсивности теплового излучения при пожарах пролива (утв. приказом МЧС РФ от 10 июля 2009 года № 404) для каждого источника разлива выполнена оценка расстояние от центра пятна при интенсивности теплового излучения 1,4 кВт/м<sup>2</sup>, при которой не будут наблюдаться негативные последствия для окружающей среды в течение длительного времени. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

### Фрагмент базы данных по безопасным расстояниям и методам локализации пожаров разлия нефтепродуктов в Волжском бассейне

№	Источник разлива	Расстояние от центра пятна при интенсивности теплового излучения 1,4 кВт/м <sup>2</sup>	Метод локализации разлива	Перекрываемая ширина водного объекта, м	Угол постановки боновых ограждений, град	Длина боновых ограждений, м
1	2	3	4	5	6	7
1	Очаг аварийности. Ярославль.	795,24	бон к берегу +перекрытие	286	30	572
2	Ярославль, рейд перевалки.	605,85	Бон к берегу	51,3	20	150

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
3	г. Волгореченск, нефтеналивной рейд.	1081,86	Бон к берегу	700	20	2048
4	Плес, нефтеналивной рейд.	207,79	Бон к берегу	114	20	333
5	г. Городец, нефтеналивной рейд	843,45	Е. локализация	300	60	347
6	Очаг аварийности. п. Слобода	730,6	Бон к берегу + перекрытие	168	20	491
7	Очаг аварийности. г. Балахна	616,55	Бон к берегу	150	20	439
8	Нижегородский рейд (Печерский рейд)	1202,16	Бон к берегу	231	20	676
9	Нижегородский рейд г. Бор	437,69	Естественная локализация	170	20	497
10	Нижегородский рейд (Подновский рейд)	1099,7	Бон к берегу	185	20	541
11	Рейд города Кстово	528,15	Бон к берегу	216	20	632
12	Нефтяной причал г. Кстово	523,09	Бон к берегу	145	20	424
13	Нефтеналивной рейд. П. Великий Враг	1320,05	Бон к берегу	314	20	919
14	Нефтеналивной рейд. Д. Троицкий Посад	590,37	Охват	530 (длина – 583 м)	60	1696
15	Нефтяной причал. Г. Коэмодемьянск	577,3	Охват	390 (длина – 468 м)	60	1326
16	Нефтеналивной рейд, п. Вурнары	484,51	Бон к берегу	277	60	320

Далее на основании полученных данных и рекомендаций [20] выбирался метод локализации пожара разлива с использованием негорючих боновых ограждений, определялась перекрываемая ширина водного объекта, угол постановки и длина боновых ограждений (см. табл. 2).

Анализ полученных данных показал значительный уровень вариации исследуемых величин, что предполагает необходимость

группировки и разработки классификации источников разлива нефти по степени опасности. В качестве основного группировочного признака выбрано расстояние от центра пятна при интенсивности теплового излучения 1,4 кВт/м<sup>2</sup>, при которой не будут наблюдаться негативные последствия для окружающей среды.

Деление на группы выполнено по Стерджессу Иетсу. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3  
Классификация источников разлива нефти Волжского бассейна по степени опасности для окружающей среды пожаров разлиния

№	Наименование класса	Диапазон изменения безопасного расстояния от центра пятна, м	Количество источников разлива в группе/доля группы, %	Представитель и группы	Метод локализации и разлива	Угол постановки боновых ограждений, град	Длина боновых ограждений, м
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Чрезвычайно опасные	1508,06 – 1074,66	6/13,04	Очаг аварийности, Волго-Донской канал им. В.И. Ленина, Волгоград; Нефтеналивной рейд г. Сызрань 3	Бон к берегу	20	541 – 6143

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8
2	Особо опасные	1074,66 – 857,96	9/19,57	Очаг аварийности, урочище Кошан; Нефтеналивной рейд, г. Саратов 2	Охват; Бон к берегу	20; 40; 60; 90	271 – 2809
3	Сильно опасные	857,96 – 641,26	15/32,61	Очаг аварийности, г. Ярославль; Нефтеналивной рейд, г. Городец	Бон к берегу +перекрытие; Естественная локализация; Охват; Бон к берегу	20; 30; 40; 60	266 – 5072
4	Средне опасные	641,26 – 207,86	14/34,78	Очаг аварийности, перекат Никольский; Нефтяной причал г. Кстово	Естественная локализация; Охват; Бон к берегу	20; 60	106 – 1696

Всего выявлено четыре класса источников разлива нефти: чрезвычайно опасные, особо опасные, сильно опасные и средне опасные. При этом доля первых двух классов превышает 32% от общего количества источников и в сочетании с преимущественным методом локализации «бон к берегу» свидетельствует о высоком уровне риска

последствий на дистанции до 1500 м от центра нефтяного пятна.

Полученные данные обеспечивают построение регрессионной зависимости для оценки безопасного расстояния от площади нефтяного пятна в программе STATISTIKA 8. Результаты показаны на рис. 5.

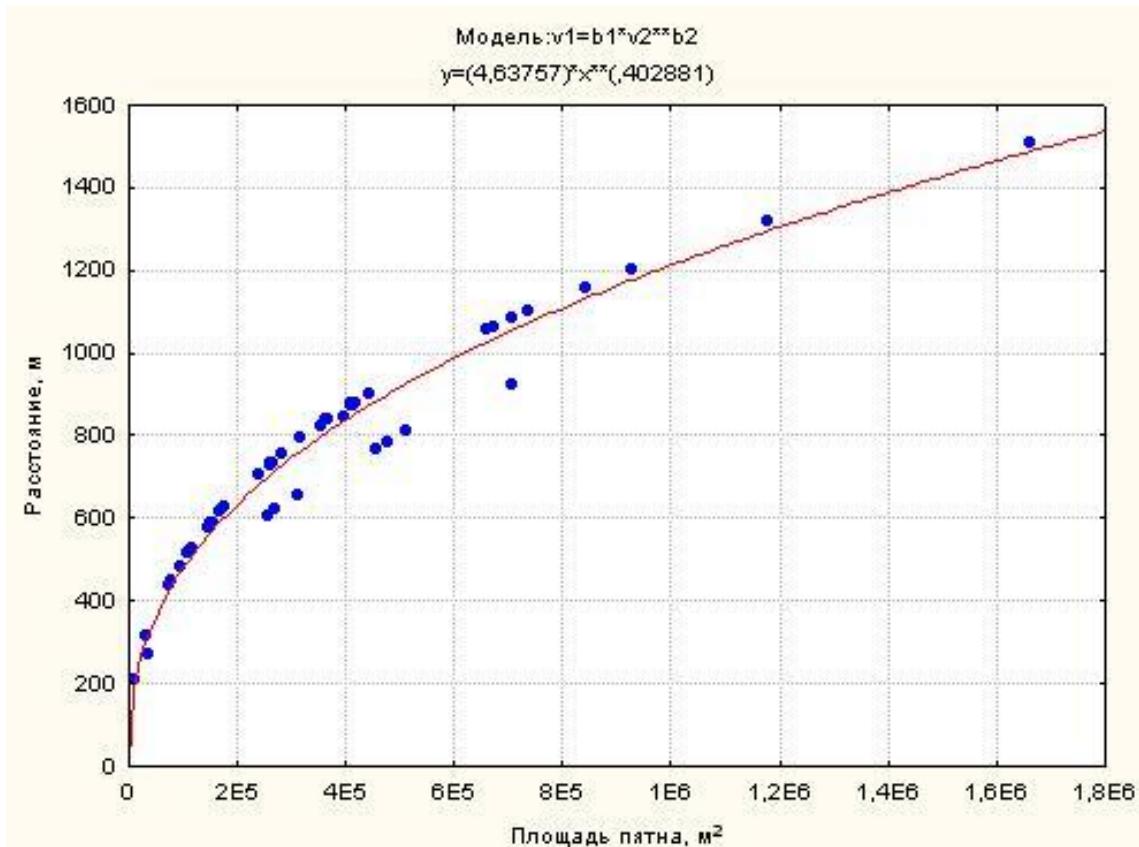


Рис. 5. Уравнение связи между безопасным расстоянием при пожаре разлития нефтепродуктов и площадью пятна

Уравнение связи имеет вид:

$$R_B = 4,63757 S_{\Pi}^{0,402881} \quad (1)$$

где  $R_B$  – безопасное расстояние от центра пятна при интенсивности теплового излучения  $1,4 \text{ кВт}/\text{м}^2$ , при которой не будут наблюдаться негативные последствия для окружающей среды, м;  $S_{\Pi}$  – площадь нефтяного пятна,  $\text{м}^2$ .

Объясненная доля дисперсии составила 0,965, коэффициент детерминации – 0,98; что свидетельствует о высоком качестве разработанного уравнения.

Уравнение (1) получено для значений площади в диапазоне от 12496 до  $1660256 \text{ м}^2$  и справедливо в границах увеличенного на 1/3 размаха вариации данного диапазона, т.е. от 0 до  $2209509,3 \text{ м}^2$ .

Выполненные исследования определяют следующую методику (последовательность) оценки опасности пожаров разлия нефтепродуктов на водных объектах в границах отдельных Администраций внутренних водных путей (рис. 6):

1) Формирование базы данных (БД) по источникам разливов нефти для рассматриваемого бассейна внутренних водных путей. В качестве источников рассматриваются очаги аварийности транспортных судов, нефтяные причалы, нефтеналивные рейды. Дополнительно могут быть учтены подводные переходы магистральных нефтепроводов.

2) Оценка влияния различных факторов на площадь нефтяного загрязнения. В качестве факторов рекомендуется рассматривать: скорость течения, температура воздуха, температура воды, объем и тип разлитого нефтепродукта, высота волны, извилистость берега, скорость и направление ветра, тип берега, ширина реки. Тестирование значимости исследуемых факторов целесообразно выполнять на основе дробного двухуровневого факторного плана Бокса и Хантера [21].

3) Математическое прогнозирование разливов нефти с учетом всех значимых факторов. В качестве системы моделирования может применяться программа PISCES 2 или иная программа, в которой могут быть учтены значимые факторы.

4) Определение максимально возможной площади нефтяного загрязнения. При этом определяется значение площади, время и место его достижения с момента разлива.

5) Расчет безопасного расстояния от центра пятна при реализации пожара разлия. В качестве безопасной дистанции выбрано расстояние от центра облака при интенсивности теплового излучения  $1,4 \text{ кВт}/\text{м}^2$ , при которой не будут наблюдаться негативные последствия для окружающей среды.

6) Выбор метода локализации, расчет длины негорючих боновых заграждений. При этом учитывается скорость течения и перекрываемая ширина водного объекта.

7) Создание классификации источников разлива нефти в границах бассейна внутренних водных путей по уровню опасности при реализации

пожара разлия. Также на этом этапе выполняется построение уравнение связи между безопасным расстоянием при пожаре разлия нефтепродуктов и площадью пятна. Данное уравнение целесообразно применять для оперативной оценки безопасной дистанции.

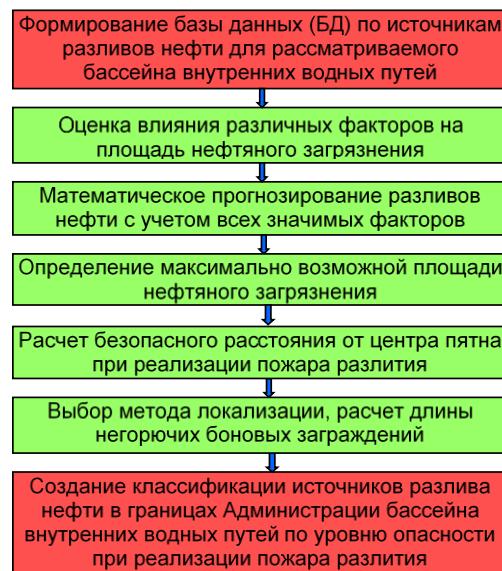


Рис. 6. Методика оценки опасности пожаров разлия нефтепродуктов на водных объектах в границах отдельных Администраций внутренних водных путей

## Заключение

Путем совместного применения методов имитационного моделирования разливов нефти и математической статистики выполнено научное обоснование и разработка методики оценки опасности пожаров разлия нефтепродуктов на водных объектах в границах отдельных Администраций бассейнов внутренних водных путей, создана классификация источников разлива нефти в границах бассейна внутренних водных путей по уровню опасности при реализации пожара разлия (на примере Волжского бассейна).

При этом выявлено четыре класса источников разлива нефти, доля первых двух наиболее опасных классов превышает 32% от общего количества источников, что в сочетании с преимущественным методом локализации «бон к берегу» свидетельствует о высоком уровне риска последствий пожаров разлия нефтепродуктов в Волжском бассейне на дистанции до 1500 м от центра нефтяного пятна.

Для оперативной оценки безопасной дистанции выполнено построение уравнение связи между безопасным расстоянием при пожаре разлия нефтепродуктов и площадью пятна.

Объясненная доля дисперсии составила 0,965, коэффициент детерминации – 0,98; что свидетельствует о высоком качестве полученного уравнения, справедливого для широкого диапазона площади нефтяного загрязнения от 0 до  $2209509,3 \text{ м}^2$ .

Полученные результаты обеспечивают оценку потребности в негорючих боновых заграждениях для локализации пожаров разлия

нефтепродуктов и оперативную оценку безопасной дистанции при их установке в Волжском бассейне при разработке мероприятий по локализации и

ликвидации нефтяного загрязнения, возникающего при авариях судов, а также подводных переходов магистральных нефтепроводов.

### Литература

1. L. van Gelderen, L. M.V. Malmquist, G. Jomaas, Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water, Fuel, Volume 191, 2017, pp. 528-537, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.109>.
2. A. T. Hoang, V. V. Pham, D. N. Nguyen, A Report of Oil Spill Recovery Technologies, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 7 (2018) pp. 4915-4928, Research India Publications. <http://www.ripublication.com>
3. Пластиинин А.Е. Оценка механического воздействия на окружающую среду при взрывах на танкерах. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 1 (29). С. 42-52. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-42-52
4. Наумов В.С., Пластиинин 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.
5. Наумов В.С., Пластиинин А.Е., Каленков А.Н., Родина Н.С. Моделирование погружения темных нефтепродуктов при разливе на водную поверхность. Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. № 1 (55). С. 194-201. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.026>
6. 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.
7. Zodiatis, G., Lardner, R., Alves, T.M., Krestenitis, Y., Perivoliotis, L., Sofianos, S., Spanoudaki, K. (2017). Oil spill forecasting (prediction) Journal of Marine Research, 75(6): 923-953. <https://doi.org/10.1357/002224017823523982>
8. 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.
9. Шматкова Е.Ю., Пластиинин 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. Helle, I., Lecklin, T., Jolma, A., Kuikka, S. (2011). Modeling the effectiveness of oil combating from an ecological perspective - A Bayesian network for the Gulf of Finland; the Baltic Sea. Journal of Hazardous Materials, 185(1): 182-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.017>
11. Наумов В.С., Пластиинин 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. DOI: [10.37220/MIT.2021.52.2.016](https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.016).
12. 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. DOI 10.1515/jok-2016-0028
13. M. Perkovic, M. Ristea, K. Lazuga. (2015). Simulation based emergency response training. Scientific Bulletin of Naval Academy 19(1): 85-90. DOI: [10.21279/1454-864X-16-I1-015](https://doi.org/10.21279/1454-864X-16-I1-015)
14. 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.
15. Cihat Aşan, Burcu Özsoy, Aydin Şihmantep, 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. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110813>
16. 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. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/172/1/012012/pdf>
17. 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. DOI: [10.2495/CP110231](https://doi.org/10.2495/CP110231)
18. 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.
19. Aps, R., Sawano, N., Hamada, S., Fetissov, M. (2010). Bayesian inference in oil spill response management. WIT Transactions on Information and Communication Technologies. Vol 43, PART I: PI35-PI46. doi:[10.2495/RISK100041](https://doi.org/10.2495/RISK100041)
20. Пластиинин А.Е. Разработка матриц выбора средств борьбы с разливами нефти. Речной транспорт (XXI век). 2014. № 2 (67). С. 53-61.
21. Волкова Н.И., Наумов В.С., Пластиинин А.Е., Захаров В.Н. Оценка влияния различных факторов на площадь нефтяных пятен в районе Средней Волги. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2019. Т. 27. № 4. С. 325-336. DOI: [10.22363/2313-2310-2019-27-4-325-336](https://doi.org/10.22363/2313-2310-2019-27-4-325-336)

### References

1. L. van Gelderen, L. M.V. Malmquist, G. Jomaas, Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water, Fuel, Volume 191, 2017, pp. 528-537, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.109>.
2. T. Hoang, V. V. Pham, D. N. Nguyen, A Report of Oil Spill Recovery Technologies, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 7 (2018) pp. 4915-4928, Research India Publications. <http://www.ripublication.com>
3. Plastinin A. E. Assessment of mechanical impact on environment at explosions on tankers. Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov. 2015. No. 1 (29). pp. 42-52. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-42-52
4. 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.
5. Viktor S. Naumov, Andrey E. Plastinin, Aleksandr N. Kalenkov, Natalia S. Rodina, Simulation of the immersion of dark oil products upon spill on the water surface, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 194—201. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.026>
6. 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.
7. Zodiatis, G., Lardner, R., Alves, T.M., Krestenitis, Y., Perivoliotis, L., Sofianos, S., Spanoudaki, K. (2017). Oil spill forecasting (prediction) Journal of Marine Research, 75(6): 923-953. <https://doi.org/10.1357/002224017823523982>
8. 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.
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. Helle, I., Lecklin, T., Jolma, A., Kuikka, S. (2011). Modeling the effectiveness of oil combating from an ecological perspective - A Bayesian network for the Gulf of Finland; the Baltic Sea. Journal of Hazardous Materials, 185(1): 182-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.017>
11. 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. DOI: [10.37220/MIT.2021.52.2.016](https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.016).
12. 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. DOI 10.1515/jok-2016-0028
13. M. Perkovic, M. Ristea, K. Lazuga. (2015). Simulation based emergency response training. Scientific Bulletin of Naval Academy 19(1): 85-90. DOI: [10.21279/1454-864X-16-I1-015](https://doi.org/10.21279/1454-864X-16-I1-015)
14. 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.
15. Cihat Aşan, Burcu Özsoy, Aydin Şihmanteppe, 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. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110813>
16. 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. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/172/1/012012/pdf>
17. 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. DOI: [10.2495/CP110231](https://doi.org/10.2495/CP110231)
18. 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.
19. Aps, R., Sawano, N., Hamada, S., Fetissov, M. (2010). Bayesian inference in oil spill response management. WIT Transactions on Information and Communication Technologies. Vol 43, PART I: PI35-PI46. doi:[10.2495/RISK100041](https://doi.org/10.2495/RISK100041)
20. Plastinin A. E. Assessment of the risk of transport accidents. River transport (XXI century). 2014. No. 2 (67). pp. 53-61.
21. Volkova Nadezhda I., Naumov Viktor S., Plastinin Andrey E., Zakharov Vasily N. Estimation of various factors impact on the area of oil patches in the Middle Volga region. Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety. 2019. T. 27. No. 4. pp. 325-336. DOI: [10.22363/2313-2310-2019-27-4-325-336](https://doi.org/10.22363/2313-2310-2019-27-4-325-336)

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Виктор Степанович Наумов**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf\_oospb@vsuwt.ru

**Андрей Евгеньевич Пластинин**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: plastininae@yandex.ru

**Надежда Ивановна Волкова**, аспирант кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: volkova.ni@vsuwt.ru

**Алексей Дмитриевич Шапошников**, аспирант кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: leha.shaposhnikoff@yandex.ru

**Viktor S. Naumov**, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 603951, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: kaf\_oospb@vsuwt.ru

**Andrey E. Plastinin**, assistant professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 603951, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: plastininae@yandex.ru

**Nadezhda I. Volkova**, graduate student of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, st. Nesterova, 5, N. Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: volkova.ni@vsuwt.ru

**Alexei D. Shaposhnikov**, graduate student of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, st. Nesterova, 5, N. Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: leha.shaposhnikoff@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 27.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 28.04.2022.



**Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE  
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3

e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ  
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА  
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте [www.morintex.ru](http://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](mailto:mit-journal@mail.ru) (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

**Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».**

На страницах журнала публикуются **НОВЫЕ** научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставляемому 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 ИНТЕЛЛЕКТАЛЬНЫЕ 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