

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

110100100100100010101010110101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)  
0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)  
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110  
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100  
00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101  
1101110011001010111100101010001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010  
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001  
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100  
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



**№ 1 Том 1 2022**  
**№ 1 Part 1 2022**

Morskie intelektual'nye tehnologii



0100011011000001101101100010100100111010011100110100111010011101001110101000011101100111001010  
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001  
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110  
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001  
1001101001101111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010  
010001101100000110110110001010010011101001110011010011101001110100110101000010 011





# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 том 1 2022 Сквозной номер 55

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;
- Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие;
- Системный анализ, теоретические основы информатики;
- Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;
- Интеллектуальные системы в судостроении;
- 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 № 1 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).**

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
- Physical fields of ship, ocean, atmosphere and their interaction
- System analysis, foundations of information science
- Automation and control of processes and productions
- Intelligent systems in shipbuilding
- Mathematical modelling and numerical procedures,

### The journal is coming since 2008

#### Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index u and into international abstract database Web of Science (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (E-mail: [mit-journal@mail.ru](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:** Lotsmanskaya, 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 advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

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

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

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2022



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

[www.morintex.ru](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 РАН, Санкт-Петербург

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

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

**Члены Редколлегии**

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, доктор технических наук, 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 технологии, Норвегия

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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



ISSN 2073-7173  
ISSN 2588-0233

# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

[www.morintex.ru](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, Institute of Transportation 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

### **Members of Editorial Staff**

V.G. Bugaev, Dr.Sci.(Eng), Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia  
E.P. 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 Dr. Sci. (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, Institute of Transportation 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**, д.т.н., 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**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Борисович Мелехин**, д.т.н., профессор, Дагестанский государственный технический университет
- **Олег Николаевич Петров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Иван Борисович Друзь**, д.т.н., профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Сергей Павлович Столяров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Галина Валентиновна Герман**, д.т.н., профессор Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Николаевич Павликов**, к.т.н, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Андрей Борисович Фомичев**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Михайлович Барановский**, д.т.н., профессор, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Сергей Павлович Глушков**, д.т.н., профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения
- **Анатолий Иванович Сабадаш**, д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Александр Александрович Родионов**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Анатольевич Смирнов**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Виктория Юрьевна Семенова**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Евгений Геннадьевич Бурмистров**, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Владимир Николаевич Тряскин**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Михаил Анатольевич Москаленко**, д.т.н., профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Юрий Семёнович Федосенко** д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Александр Алексеевич Таранцев**, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Валерий Юрьевич Каминский**, к.т.н, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Алексей Леонидович Стариченков**, д.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**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 B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Dagestan State Technical University
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Ivan B. Druz**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Galina G. German**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Sergej N. Pavlikov** Ph.D. (Eng), Professor, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University
- **Andrej B. Fomichev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Alexander M. Baranovsky**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Siberian State University of Water Transport
- **Sergej P. Glushkov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Siberian Transport University
- **Anatolij I. Sabadash**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Alexander A. Rodionov**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Aleksandr A. Smirnov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Evgenij G. Burmistrov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport
- **Vladimir N. Tryaskin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Mikhail A. Moskalenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MSU named after adm. G.I. Nevelskoy
- **Yurij S. Fedosenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport
- **Alexander A. Tarantsev**, professor, Dr. Sci. (Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Valery Yu. Kaminsky**, Ph.D. (Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Aleksej L. Starichenkov**, Dr. Sci. (Eng.), Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"



# 51 центральный конструкторско - технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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





**СОДЕРЖАНИЕ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ**

**Таранцев А.А., Поташев Д.А., В.И.Куватов** Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на парамах..... 12

**Москаленко М.А., Друзь И.Б.** Оценка уровня конструктивной безопасности бортовых перекрытий судов ледового плавания на бифуркационных моделях..... 18

**ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

**Фам Чунг Хиеп, Кулеш В.А.** Сравнительный анализ параметров взаимодействия судов с грунтом 24

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Абашкин Е.Е., Ткачева А.В.** Исследование локального комбинированного теплового воздействия на получение неразъемных соединений..... 30

**Колесникова О.В., Леонтьев Л.Б., Лелюхин В.Е.** Оперативное управление судоремонтным производством с использованием цифровых двойников..... 37

**Душко В.Р., Иванова О.А., Крамарь В.А., Родькина А.В.** Совершенствование методик проектирования судов в аспекте регламента технических требований к электрохимической защите 44

**Саламех Али, Алсаид Мазен** Исследование влияния типа связывающего компонента на механические характеристики полимерных композиционных материалов..... 52

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

**Половинкин В.Н., Федулов С.В., Титушкин С.И., Соловьев Д.Н.** Регенеративный единый двигатель особого назначения для подводных лодок С.А. Базилевского..... 63

**Молоков Н.С., Бойко С.П., Кича П.П.** Автоматизированный выбор оптимального режима сепарирования моторного масла при его комбинированной очистке в судовых дизелях..... 70

**Руднев Б.И., Повалихина О.В.** Результаты исследования оптических характеристик частиц сажи и параметров радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля..... 80

**Лобанов А.В., Першин Н.В., Кускова О.Л., Медведков И.С.** Перспективы применения сжиженного природного газа на водном транспорте Санкт-Петербурга..... 86

**Горелик Г.Б., Мозолев О.Н., Чистяков А.Ю., Даничкин В.Н.** Моделирование и расчетный эксперимент с целью снижения минимальной частоты вращения судового дизеля под нагрузкой и при холостом ходе..... 95

**Симашов Р.Р., Чехранов С.В.** Определение газодинамических характеристик сопловых аппаратов со сверхзвуковыми прямоугольными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин..... 107

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ,**

**Искандеров Ю.М.** Методы выявления знаний и их применение для создания интеллектуальных систем..... 112

**Малыгин И.Г., Кузнецова Е.Ю.** Предложения по разработке интеллектуальной системы управления экологической безопасностью Северного морского пути..... 121

**Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Кузнецова Е.Ю.** Оценка эффективности обеспечения экологической безопасности персонала судна..... 128

**Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородина О.В.** Исследование эффективности морской интеллектуальной видеосистемы обработки подводных изображений..... 133

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

**Тюленев К.Г.** Организация мультимодальных перевозок на основе методики оценки валовой прибыли в единицу времени..... 141

**Мелехин В.Б., Ирзаев Г.Х.** Оптимальное управление реализацией сложных технологических процессов в условиях производственного предприятия..... 145

**Домнина О.Л.** Анализ смещения участков концентрации транспортных происшествий в пространстве и времени в границах Волжского бассейна..... 151

|   |     |
|---|-----|
| <b>Коренев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г.</b> Формирование маршрута движения судна в ограниченной акватории с учетом требования к изменению скорости хода.....                    | 160 |
| <b>Ружицкая Е.В., Баранчугов И.А., Ноткин Б.С., Змеу К.В.</b> Способ калибровки промышленных роботов для судостроения с использованием модернизированного тросовытяжного датчика..... | 169 |
| <b>Чемодаков А.Л.</b> Алгоритмы процесса управления балластной системой при промывке балластных танков.....   | 175 |
| <b>ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В СУДОСТРОЕНИИ</b>  |     |
| <b>Филатов В.И.</b> Модель нечёткой системы поддержки принятия решений в задачах управления скоростью судна при следовании судна по оптимальному пути.....                            | 180 |
| <b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ</b>  |     |
| <b>Домнина О.Л.</b> Оценка риска экологических последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами на примере Волжского бассейна.....                                      | 187 |
| <b>Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков А.Н., Родина Н.С.</b> Моделирование погружения темных нефтепродуктов при разливе на водную поверхность.....                                  | 194 |
| <b>Бойцов А.Н., Осипов Е.В., Лисиенко С.В., Вальков В.Е., Баринов В.В.</b> Моделирование взаимодействия рыболовной системы с дальневосточной сардиной (иваси) и скумбрией.....        | 202 |
| <b>Павликов С.Н., Копаева Е.Ю., Колесов Ю.Ю., Петров П.Н., Крючков А.Н.</b> Метод гидроакустической связи.....  | 208 |
| <b>Фахми Ш.С., Селиверстов Я.А., Пышкина Н.Ю., Хасан Я.А.</b> Систематизация алгоритмов спектральной обработки морских изображений.....   | 215 |
| <b>Астапкович А.М., Кожемякин И.В., Шарафутдинова Т.К., Шустов А.С.</b> Поточковые сетевые протоколы и результаты проекта RACUN.....  | 221 |

| CONTENTS   | page |
|--|------|
| <b>DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS</b>  |      |
| <b>Alexander A. Tarantsev, Dmitriy A. Potashev, Valery I. Kuvatov</b> Fire- and Explosion safety car decks (parking) on ferries.....   | 12   |
| <b>Mikhail A. Moskalenko, Ivan B. Druz</b> Assessment of the level of structural safety of the side floors of ice navigation vessels on bifurcation models.....  | 18   |
| <b>THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS</b>   |      |
| <b>Hiep Trung Pham, Victor A. Kulesh</b> Comparative analysis of parameters of vessels interaction with the ground.....  | 24   |
| <b>SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION</b>   |      |
| <b>Evgeny E. Abashkin, Anastasia V. Tkacheva</b> Study of Local Combined Heat Impact on Permanent Joints.....  | 30   |
| <b>Olga V. Kolesnikova, Lev B. Leontiev, Vladimir E. Lelyukhin</b> Operational management of ship repair production using digital twins.....   | 37   |
| <b>Veronika R. Dushko, Olga A. Ivanova, Vadim A. Kramar, Anna V. Rodkina</b> Ship design methods improving in the aspect of the technical requirement regulations for electrochemical protection.....                            | 44   |
| <b>Salamekh Ali, Alsaïd Mazen</b> Investigation of the binding component type effect on the mechanical characteristics of polymer composite materials.....   | 52   |
| <b>SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)</b>   |      |
| <b>Valerij N. Polovinkin, Sergey V. Fedulov, Sergey I. Titushkin, Dmitry N. Soloviev</b> Regenerative Ensemble Submarine Engine of a Special Purpose Made by Sergei A. Bazilevsky.....   | 63   |
| <b>Nikolai S. Molokov, Sergey P. Boik, Pavel P. Kicha</b> Automated selection of the optimal mode of separation of engine oil during its combined cleaning in marine diesel engines.....   | 70   |
| <b>Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina</b> Results of investigation of optical characteristics particles of soot and parameters of radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber.....                             | 80   |
| <b>Alexey V. Lobanov, Nikita V. Pershin, Olga L. Kuskova, Ilya S. Medvedkov</b> Prospects for the use of liquefied natural gas in the water transport of St. Petersburg.....   | 86   |
| <b>Gennadiy B. Gorelik, Oleg N. Mozolev, Alexandr Yu. Chistyakov, Vitaliy N. Danichkin</b> Modeling and computational experiment in order to reduce the minimum rotational speed of a marine diesel engine at load and idle..... | 95   |
| <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.....        | 107  |
| <b>SYSTEM ANALYSIS, FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE</b>   |      |
| <b>Yury M. Iskanderov</b> Knowledge Identifying Methods and Their Application to Create Intelligent Systems  | 112  |
| <b>Igor G. Malygin, Elena Y. Kuznetsova</b> Proposals for development of intelligent environmental safety management system for the Northern Sea Route.....  | 121  |
| <b>Dmitriy A. Skorokhodov, Valery Yu. Kaminsky, Elena Y. Kuznetsova</b> Assessment of the effectiveness of ensuring the environmental safety of the ship's personnel.....  | 128  |
| <b>Shakeeb S. Fahmi, Natalia V. Shatalova, Elena V. Kostikova, Olga V. Borodina</b> Investigation of the effectiveness of the marine intelligent video system for processing underwater images.....                              | 133  |
| <b>AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS</b>   |      |
| <b>Kirill G. Tyulenev</b> Management of multimodal transportation based on methodology for estimating gross profit per time period.....  | 141  |
| <b>Vladimir B. Melekhin, Gamid Kh. Irzaev</b> Optimal management of the implementation of complex technological processes in a manufacturing enterprise.....   | 145  |
| <b>Olga L. Domnina</b> Analysis of the displacement of areas of concentration of traffic accidents in space and time within the boundaries of the Volga basin.....   | 151  |
| <b>Alexei S. Korenev, Sergei P. Khabarov, Andrei G. Shpectorov</b> Ship's route planning in a limited area with speed changing requirement.....  | 160  |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Elena V. Ruzhitskaya, Il'ya A. Baranchugov, Boris S. Notkin, Konstantin V. Zmeu</b> A method for calibrating industrial robots for shipbuilding using an upgraded pull-wire sensor..... | 169 |
| <b>Andrei L. Chemodakov</b> Control algorithms for ballast tanks flushing process.....   | 175 |

***INTELLIGENT SYSTEMS IN SHIPBUILDING***

|  |     |
|--|-----|
| <b>Viktor I. Filatov</b> Fuzzy model of decision support system for ship's speed management in case of ship is following the optimal predicted path..... | 180 |
|--|-----|

***MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES***

|   |     |
|---|-----|
| <b>Olga L. Domnina</b> Risk Assessment of Environmental Consequences from Transport Accidents with Dry Cargo Vessels on the Example of the Volga Basin.....   | 187 |
| <b>Viktor S. Naumov, Andrey E. Plastinin, Aleksandr N. Kalenkov, Natalia S. Rodina</b> Simulation of the immersion of dark oil products upon spill on the water surface.....                                  | 194 |
| <b>Anatoly N. Boytsov, Evgeniy V. Osipov, Svetlana V. Lisienko, Vladimir E. Valkov, Vasily V. Barinov</b> Modeling the interaction of the fishing system with the japanese sardine (Iwashi) and mackerel..... | 202 |
| <b>Sergey N. Pavlikov, Ekaterina Yu. Kopaeva, Yuriy Yu. Kolesov, Pavel .N. Petrov, Andrey N. Kryuchkov</b> Hydroacoustic communication method .....   | 208 |
| <b>Shakeeb S. Fahmi, Yaroslav A. Seliverstov, Nadezhda Y. Pyshkina, Yazid A. Hassan</b> Systematization of algorithms for spectral processing of marine images.....   | 215 |
| <b>Alexander M. Astapovich, Igor' V. Kozhemyakin, Taisiia K. Sharafutdinova, Aleksey S. Shustov,</b> Flood network protocols and project RACUN results.....   | 221 |

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.5.02; 614.842.6; 629.331

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.001>

### Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на паромках

А.А. Таранцев<sup>1,2</sup> t\_54@mail.ru, Д.А. Поташев<sup>2</sup> dim-po@igps.ru, В.И. Куватов<sup>2</sup> kyb.valery@yandex.ru

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет Государственный противопожарной службы МЧС России

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблема обеспечения пожаровзрывобезопасности паромов, перевозящих автомобили на закрытых палубах. На примерах показано, что пожары и взрывы на паромках могут привести к большому материальному ущербу и гибели людей. С использованием модели Р.Альперта даны оценки теплового нагружения перекрытия автомобильной палубы при пожаре для случаев пролива топлива и горения собственно автомобиля. Показано, что возникшие тепловые нагрузки могут привести как к потере несущей способности палубы, так и возгоранию соседних автомобилей. Отдельно рассмотрена проблема взрывоопасности на автомобильных палубах ввиду появления во всё большем количестве газобаллонных автомобилей, автомобилей на комбинированном и водородном топливе. Приведены особенности взрыва в замкнутом объёме (сложные ударно-волновые процессы, опрокидывание соседних автомобилей, образование волны разрежения), которым является закрытая автомобильная палуба. Показано, что при взрыве и горении газа помимо ударной волны образуется облако раскалённых газов, излучение от которого приводит к ожогам кожи и провоцирует новые очаги пожаров. Проведена аналогия между паромом с автомобильными палубами и подземной автостоянкой. Даны рекомендации по снижению взрывопожароопасности паромов.

**Ключевые слова:** паромы, автомобильные палубы, пожар, взрыв, тушение, защита, аварийно-спасательные работы.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность Дмитрию Алексеевичу Скороходову за содействие в работе.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках работы над кандидатской диссертацией

**Для цитирования:** Таранцев А.А., Поташев Д.А. Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на паромках. Морские интеллектуальные технологии 2022. Т. 1. Номер 1. С. 12—17

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.001>

### Fire- and Explosion safety car decks (parking) on ferries

Alexander A. Tarantsev<sup>1,2</sup> t\_54@mail.ru, Dmitry A. Potashev<sup>2</sup> dim-po@igps.ru,

Valery I. Kuvatov<sup>2</sup> kyb.valery@yandex.ru

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of RAS, <sup>2</sup>St-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, St-Petersburg, Russia

**Abstract.** The article considers the problem of ensuring the fire safety of ferries carrying cars on closed decks. Examples show that fires and ferry explosions can lead to large material damage and death of people. Using the R. Alpert model, the heat loading of the car deck overlapping during fire is given for cases of fuel spilt and burning the car itself. It is shown that the emerging heat loads can lead both to the loss of the bearing capacity of the deck and the ignition of the neighboring cars. Separately, the problem of explosion hazard on car decks due to the appearance of increasing amounts of gas-filled cars, cars on combined and hydrogen fuel is considered. The features of the explosion in the closed volume are given (complex shock-wave processes, tipping the adjacent cars, the formation of the vacuum wave), which is a closed car deck. It is shown that during the explosion and burning of gas, in addition to the shock wave, cloud of fascinated gases is formed, radiation from which leads to skin burns and provokes new foci of fires. An analogy was carried out between the ferry with car decks and an underground parking. Recommendations are given to reduce the explosion hazard of ferries.

**Keywords:** ferries, car decks, fire, explosion, quenching, protection, emergency rescue work

**Gratitude:** The authors are grateful to Dmitry A. Skorokhodov for assistance in the work.

**Financial Support:** The study was carried out in the framework of the candidate dissertation

**For citation:** Alexander A. Tarantsev, Dmitry A. Potashev, Fire- and explosion safety car decks (parking) on ferries. 2022.Part. 1, no. 1. P. 12—17

#### Введение

Паромное сообщение нашло широкое распространение при грузопассажирских перевозках как по внутренним водоёмам страны, так и между разными странами. Во втором случае используются

паромы [1], как правило, большого водоизмещения (рис.1), способные перевозить значительное количество пассажиров и сотни единиц автомобильной техники. Некоторые типы паромов предусматривают помимо автомобилей

транспортировку и подвижного состава железнодорожного транспорта.



Рис.1. Многопалубный паром (здесь и далее фото из открытых источников в интернете)

### Проблема пожаровзрывобезопасности паромов

Важной проблемой при эксплуатации паромов является обеспечение пожарной безопасности, поскольку пожары (рис.2), как правило, приводят к большому ущербу и даже катастрофическим последствиям.



Рис.2. Пожар на пароме

Из статистики пожаров на крупных паромах:

- 02.09.2018 г. "Regina Seaways" (Литва), вместимость 1000 пасс., 600 а/м. Все спасены.
- 02.02.2015 г. "Norman Atlantic" (Греция), вместимость 850 пасс., 200 а/м. Погибли 12 чел., 2 пожарных.
- 27.02.2004 г. "Super Ferry-14" (Филиппины), при взрыве и пожаре погибли 116 чел.
- 07.04.1990 г. "Scandinavian Star" (Швеция), погибли 158 чел.
- 20.12.1987 г. "Dona Paz" (Филиппины), в пожаре при столкновении с танкером "Vector" погибли 4345 чел.

Ввиду ограниченности объёма статьи вопросам анализа статистики о причинах и последствиях пожаров на паромах должно быть посвящено отдельное исследование. Здесь же остановимся на проблеме горения автомобилей, перевозимых на паромах в больших количествах.

Современные автомобили, в состав которых входит много горючих веществ и материалов (топливо, резина покрышек, пластик, поролон и др.) обладают повышенной пожароопасностью [2]. Более того, тенденция к соблюдению экологических требований приводит к росту количества автомобилей на комбинированном топливе (ЛВЖ+газ), газобаллонных автомобилей (ГБА), автомобилей на водороде, а также электромобилей.

Если пожары электромобилей по причине механических повреждений литий-ионных аккумуляторов или их перегрева характеризуются выделением большой тепловой мощности и коротечностью, то в следствии аварийный режимов работы оборудования ГБА возможен взрыв с последующим пожаром, как правило, чревато взрывом.

Интересно отметить, что размещение автомобилей на нескольких палубах парома имеет аналогию с многоуровневыми встроенными автостоянками [3]. Но в отличие от стационарных автостоянок с железобетонными перекрытиями, металлические настилы палуб парома обладают малыми пределами огнестойкости (порядка 15 мин.), ввиду чего пожар на пароме может привести к каскадному развитию разрушений и проникновению опасных факторов пожара (ОФП) [4] на жилые палубы, в рубку управления и в машинное отделение с катастрофическими последствиями.

Конечно, на многих паромах предусмотрено строгое соблюдение правил пожарной безопасности [5, 6], применение систем противопожарной защиты, в т.ч. пожарной автоматики: систем сигнализации и оповещения, установок газового и дренчерного пожаротушения с использованием забортной воды, действия пожарных расчётов.

Тем не менее, проблема пожаров на паромах остаётся актуальной, в т.ч. и из-за перевозки автомобилей различных типов [2].

### Особенности пожаров автомобилей на закрытых палубах

Для описания динамики ОФП в ограниченных пространствах разработано достаточно много моделей, основными из которых являются интегральная, зонная и полевая [8]. Тем не менее, для экспресс-оценки температуры  $T_r$  и скорости продуктов горения  $u_r$  у горизонтального перекрытия при пожаре может использоваться модель Р.Альперта [9] (рис.3):

$$T_r = T_0 + K_T(H, r)(S_n q)^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

$$u_r = K_u(H, r)(S_n q)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная температура;  $H, r$  – геометрические параметры (рис.3), м;  $S_n$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>;  $q$  – удельная мощность пожара, кВт/м<sup>2</sup>.

Параметры  $K_T$  и  $K_u$  находятся из выражений:

$$K_T = \begin{cases} 16,9H^{-5/3} & \text{при } H > 5,577r, \\ 5,347H^{-1}r^{-2/3} & \text{при } H \leq 5,577r, \end{cases}$$

$$K_u = \begin{cases} 0,96H^{-1/3} & \text{при } H > 6,776r, \\ 0,195H^{0,5}r^{-5/6} & \text{при } H \leq 6,776r, \end{cases}$$

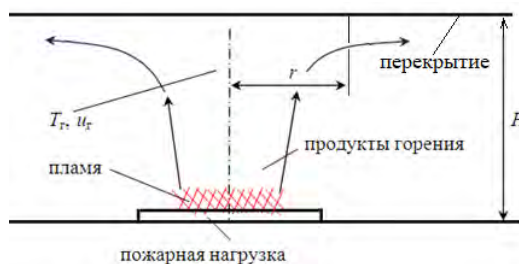


Рис.3. Расчётная схема

При постоянной форме площади пожара  $S_{п}$ , когда произошла утечка топлива из бака автомобиля, температура  $T_r$  у перекрытия (палубы) возрастает квазимгновенно (для пожара класса В [4] – секунды), она будет зависеть только от высоты  $H$  и расстояния  $r$  от оси конвективной колонки.

При пожаре класса А [4] полагают, что пожар приобретает круговую форму, в связи с чем

$$S_{п} \approx \pi(V_{п}t)^2, \quad (3)$$

где  $V_{п}$  – линейная скорость распространения пламени, м/с;  $t$  – время от начала возгорания, с.

С использованием данных из справочника [10] (для бензина  $q \approx 2550$  кВт/м<sup>2</sup>, для легковых автомобилей  $q \approx 729$  кВт/м<sup>2</sup>,  $V_{п} = 0,007$  м/с) и выражений (1)-(3) получены зависимости температуры  $T_r$  и скорости  $u_r$  продуктов горения у перекрытия (палубы) при  $H = 2,5$  м – см. табл.1-4. Нужно учитывать, что для электромобилей величина  $q$  точно не определена, но она значительно больше, чем у автомобилей с бензиновыми ДВС.

Полученные результаты свидетельствуют как об опасном тепловом нагружении перекрытия (палубы) с последующей потерей несущей способности, так и о быстром распространении ОФП с риском воспламенении соседних автомобилей.

Таблица 1

Температура (°С) у перекрытия в зависимости от расстояния от оси конвективной колонки при горении пролива ЛВЖ

| $S_{п},$<br>м <sup>2</sup> | $r, \text{ м}$ |        |       |       |       |       |
|----------------------------|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                            | 0              | 1      | 2     | 4     | 6     | 8     |
| 1                          | 705,0          | 421,3  | 314,0 | 179,2 | 141,5 | 120,3 |
| 2                          | 1107,4         | 657,0  | 486,7 | 272,7 | 212,9 | 179,3 |
| 3                          | 1444,9         | 854,3  | 631,5 | 351,2 | 272,7 | 228,7 |
| 4                          | 1746,1         | 1031,2 | 760,8 | 421,2 | 326,2 | 272,8 |
| 5                          | 2023,0         | 1193,4 | 879,6 | 485,5 | 375,3 | 313,4 |
| 6                          | 2281,8         | 1355,5 | 990,7 | 575,7 | 421,2 | 351,3 |

Таблица 2

Динамика температуры (°С) у перекрытия в зависимости от расстояния от оси конвективной колонки при горении легкового автомобиля

| $t,$<br>мин | $r, \text{ м}$ |        |       |       |       |       |
|-------------|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|
|             | 0              | 1      | 2     | 4     | 6     | 8     |
| 1           | 220,6          | 137,5  | 106,1 | 66,6  | 55,6  | 49,4  |
| 2           | 525,4          | 316,1  | 236,9 | 137,5 | 109,6 | 94,0  |
| 3           | 887,8          | 528,4  | 392,4 | 221,7 | 174,1 | 147,1 |
| 4           | 1293,5         | 766,1  | 566,5 | 316,0 | 265,9 | 206,5 |
| 5           | 1734,8         | 1024,6 | 755,9 | 418,6 | 324,2 | 271,2 |
| 6           | 2206,7         | 1301,0 | 958,4 | 528,2 | 407,9 | 340,3 |

Таблица 3

Скорость продуктов горения (м/с) у перекрытия в зависимости от расстояния от оси конвективной колонки при горении пролива ЛВЖ

| $S_{п},$<br>м <sup>2</sup> | $r, \text{ м}$ |      |      |      |      |      |
|----------------------------|----------------|------|------|------|------|------|
|                            | 0              | 1    | 2    | 4    | 6    | 8    |
| 1                          | 9,66           | 4,21 | 2,36 | 1,33 | 0,94 | 0,74 |
| 2                          | 12,17          | 5,30 | 2,98 | 1,67 | 1,19 | 0,94 |
| 3                          | 13,93          | 6,07 | 3,41 | 1,91 | 1,36 | 1,07 |
| 4                          | 15,33          | 6,68 | 3,75 | 2,10 | 1,50 | 1,18 |
| 5                          | 16,52          | 7,19 | 4,04 | 2,27 | 1,61 | 1,27 |
| 6                          | 17,55          | 7,65 | 4,30 | 2,41 | 1,71 | 1,35 |

Таблица 4

Изменение скорости продуктов горения (м/с) у перекрытия в зависимости от расстояния от оси конвективной колонки при горении легкового автомобиля

| $t,$<br>мин | $r, \text{ м}$ |      |      |      |      |      |
|-------------|----------------|------|------|------|------|------|
|             | 0              | 1    | 2    | 4    | 6    | 8    |
| 1           | 5,22           | 2,28 | 1,28 | 0,72 | 0,51 | 0,40 |
| 2           | 8,30           | 3,61 | 2,03 | 1,14 | 0,81 | 0,64 |
| 3           | 10,87          | 4,74 | 2,66 | 1,49 | 1,06 | 0,84 |
| 4           | 13,17          | 5,74 | 3,22 | 1,81 | 1,29 | 1,01 |
| 5           | 15,28          | 6,66 | 3,74 | 2,10 | 1,49 | 1,18 |
| 6           | 17,26          | 7,52 | 4,22 | 2,37 | 1,68 | 1,33 |

Однако наиболее полная картина пожара на автомобильных палубах парома может быть получена с использованием полевой модели пожара [8], позволяющей найти динамику ОФП (не только температуры, но и задымления, концентрации токсичных продуктов горения и  $O_2$ ) во всех точках палубы. Полевая модель [11] была успешно применена для решения аналогичной задачи для подземных автостоянок [7] как аналогов автомобильных палуб парома – см.рис.4.

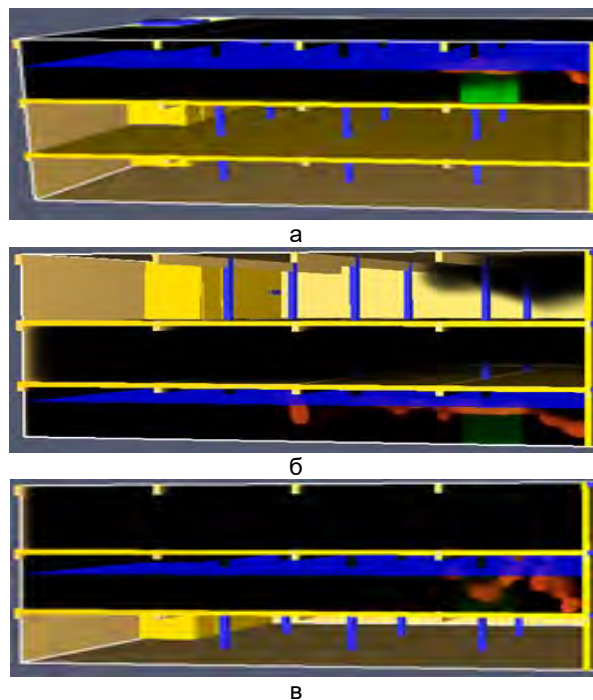


Рис.4. Визуализация ОФП на верхнем, среднем и нижнем этажах (палубах) при горении легкового автомобиля на 900-й секунде пожара

В перспективе, задавшись параметрами автомобильных палуб реального парома, можно рассчитать динамику ОФП при различных сценариях пожара и оценить тем самым риски как для пассажиров, так и для конструкции парома в целом.

#### Проблема взрывоопасности перевозимых на пароме автомобилей

С появлением ГБА и автомобилей на комбинированном (ЛВЖ+газ) и водородном топливе ввиду их повышенной взрывопожарной опасности [12] (рис.5) возникает риск серьезных инцидентов при

их перевозке таких автомобилей на паромах. Причины могут быть различными – от внешних воздействий на автомобиль при въезде на палубу, парковке, движении парома в штормовую погоду и выезде и внутренних неполадок (КЗ в электрооборудовании) до пожара соседних автомобилей и др.



а



б

Рис. 5. Взрывы (а) и пожары (б) ГБА

Нелишне заметить, что по одной из версий именно взрыв на автомобильной палубе парома «Эстония» привёл к отрыву носового визира, что при поступлении воды на полном ходу парома привело к известной трагедии.

Известно [13], что взрывы в замкнутых объёмах при том же тротиловом эквиваленте намного опаснее, чем на открытом пространстве – выход энергии наружу ограничен, возникает сложный ударно-волновой процесс с многократным отражением от стен и перекрытий, метание и опрокидывание предметов (автомобилей), разлёт осколков и разрушение ограждающих конструкций. Кроме того, при выходе ударной волны (УВ) и газов наружу в исходном объёме возникает разрежение, угрожающее обрушением перекрытия. Избыточное давление во фронте УВ  $\Delta p > 150$  кПа приводит к летальному исходу для людей.

При взрыве ГБА вследствие пожара (рис.5-б) возникает «огненный шар» (на автомобильной палубе он не будет сферической формы), тепловой

импульс которого также опасен для людей и техники, может спровоцировать новые очаги пожара. Например, в работе [12] показано, что при взрыве и возгорании пропана массой 8 кг тепловой импульс на расстоянии 10 м достигает  $112 \text{ кВт/м}^2$ , что может вызвать ожог II степени.

Тема взрывопожароопасности выходит за рамки данной статьи и требует отдельного исследования с привлечением соответствующих компьютерных программ.

В итоге для обеспечения взрывопожарной безопасности паромов, перевозящих автомобили, можно дать следующие рекомендации:

- ограничивать перевозку ГБА, автомобилей на комбинированном и водородном топливе, а также электромобилей;
- защищать металлические конструкции автомобильных палуб огнезащитными покрытиями и панелями;
- на закрытых автомобильных палубах помимо имеющихся систем пожаротушения применять прозрачные ленточные завесы для гашения энергии УВ, не препятствующие проезду автомобилей;
- предусмотреть установку датчиков загазованности с выводом информации в рубку управления и систему вентиляции;
- на проектируемых и реконструируемых паромах предусмотреть выделенные места с легко-сбрасываемыми панелями для вышеуказанных автомобилей.

Для справки следует отметить, что в работе [14] была рассмотрена проблема пожарной безопасности плавучих (пришвартованных) автостоянок и предложены пути её решения.

### Заключение

Таким образом, в статье рассмотрены вопросы особенностей паромов и инцидентов с ними. Даны количественные оценки теплового нагружения автомобильной палубы при горении автомобиля и пролитого топлива.

Показана аналогия развития пожара на автомобильных палубах парома и в подземной автостоянке. Это позволяет применить полученные результаты моделирования развития опасных факторов пожара на этажах подземной автостоянки к сценариям пожара на автомобильных палубах парома. Разница в том, что металлические палубы и переборки парома гораздо менее устойчивы к тепловым нагрузкам пожара, чем железобетонные перекрытия автостоянок.

Сформулирована проблема взрывопожарной опасности для парома, перевозящего ГБА, автомобили на комбинированном топливе и водороде. В случае взрыва на автомобильной палубе парома возникает сложный ударно-волновой процесс с последующим разрежением, что крайне опасно для парома, находящегося в плавании. Предложены некоторые пути решения проблемы взрывобезопасности автомобильных палуб парома и этажей подземной автостоянки.

В дальнейшем планируется провести компьютерное моделирование опасных факторов взрыва ГБА в подземной автостоянке и на закрытой палубе парома.



### Литература

1. Новый политехнический словарь / Под ред. А.Ю.Ишлинского. М.: Научн.изд-во «БРЭ», 2003. – 671 с.
2. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Сытдыков М.Р. О пожароопасности некоторых типов автомобилей // Электронный журнал «Вестник СПбУ ГПС МЧС России», №1, 2021, с.1-8. DOI: 10.24412/2218-130X-2021—1-1-8.
3. СП 154.13130.2013 Встроенные подземные автостоянки. Требования пожарной безопасности.
4. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. Федеральный закон от 22.07.2008 №123-ФЗ (с изменениями).
5. Правила пожарной безопасности на морских судах. Постановление Минтранса РФ от 31.10.2003 № 10.
6. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 г. СОЛАС 74. Протокол 1988 г. (с изменениями).
7. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Шидловский Г.Л. Особенности развития пожаров автомобилей в подземных автостоянках и их тушение // Проблемы управления рисками в техносфере. №1 (57), 2021, с.108-115.
8. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приказ МЧС РФ от 30.06.2009 №382 (Приложение 6).
9. Alpert R.L. Ceiling Jet Flows / SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3<sup>rd</sup> ed. Quincy MA: NFPA, 2002, P. 2-18 – 2-31.
10. Пожарная нагрузка. Справочник. СИТИС-СПН-1, редакция 3 от 15.05.2014 г.
11. Карькин И.Н. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim // Екатеринбург. 2016. - 27 с.
12. Поташев Д.А. О проблеме взрывопожароопасности подземных автостоянок // Проблемы управления рисками в техносфере. №4 (60), 2021, с.132-139.
13. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. – 432 с.
14. Таранцев А.А., Дорожкин А.С., Сморого В.В. Обеспечение пожарной безопасности плавучих автостоянок // Материалы международной НПК «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2016». ИПТ РАН, 29-30.11.2016., с.286-288.

### References

1. Novyj politekhnicheskij slovar' [new polytechnic dictionary] / Pod red. A.YU.Ishlinskogo. M.: Nauchn.izd-vo «BRE», 2003. – 671 s.
2. Tarancev A.A., Potashev D.A., Sytdykov M.R. O pozharoопасности некotoryh tipov avtomobilej [about the fire hazard of certain types of transport] // Elektronnyj zhurnal «Vestnik SPbU GPS MCHS Rossii», №1, 2021, s.1-8. DOI: 10.24412/2218-130H-2021—1-1-8.
3. SP 154.13130.2013 Vstroennye podzemnye avtostoyanki. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti [Built-in underground car parks. fire safety requirements].
4. Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti [Technical regulation on fire safety requirements]. Federal'nyj zakon ot 22.07.2008 №123-FZ (s izmeneniyami).
5. Pravila pozharnoj bezopasnosti na morskikh sudah [Fire safety rules on ships]. Postanovlenie Mintransa RF ot 31.10.2003 № 10.
6. Mezhdunarodnaya konvenciya po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 g. [International Convention for the Safety of Life at Sea 1974] SOLAS 74. Protokol 1988 g. (s izmeneniyami).
7. Tarancev A.A., Potashev D.A., SHidlovskij G.L. Osobennosti razvitiya pozharov avtomobilej v podzemnyh avtostoyankah i ih tushenie [Features of the development of car fires in underground parking lots and their extinguishing] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. №1 (57), 2021, s.108-115.
8. Metodika opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska v zdaniyah, sooruzheniyah i stroeniyah razlichnyh klassov funkcional'noj pozharnoj opasnosti [Methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard]. Prikaz MCHS RF ot 30.06.2009 №382 (Prilozhenie 6).
9. Alpert R.L. Ceiling Jet Flows / SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy MA: NFPA, 2002, P. 2-18 – 2-31.
10. Pozharnaya nagruzka. Spravochnik [Fire load. Directory]. SITIS-SPN-1, redakciya 3 ot 15.05.2014 g.
11. Kar'kin I.N. Biblioteka reakcij i poverhnostej gorenija v PyroSim [Library of reactions and combustion surfaces in PyroSim] // Ekaterinburg. 2016. - 27 s.
12. Potashev D.A. O probleme vzryvopozharoопасности podzemnyh avtostoyanok [About the problem of explosion and fire hazard of underground parking lots] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. №4 (60), 2021, s.132-139.
13. Beschastnov M.V. Promyshlennye vzryvy. Ocenka i preduprezhdenie [Industrial explosions. Evaluation and warning]. M.: Himiya, 1991. – 432 s.
14. Tarancev A.A., Dorozhkin A.S., Smorygo V.V. Obespechenie pozharnoj bezopasnosti plavuchih avtostoyanok [Ensuring fire safety of floating car parks] // Materialy mezhdunarodnoj NPK «Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2016». IPT RAN, 29-30.11.2016., s.286-288.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: t\_54@mail.ru

**Дмитрий Анатольевич Поташев**, старший преподаватель-методист, Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: dim-po@igps.ru

**Валерий Ильич Куватов**, доктор технических наук, профессор, профессор Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail:

**Alexander A. Tarantsev**, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the laboratory of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Moskovskiy prospect 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: t\_54@mail.ru

**Dmitry A. Potashev**, Senior Teacher-Methodist, St. Petersburg University of State Fire Services of Emercom of Russia, 149, Moskovskiy prospect, St. Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: dim-po@igps.ru

**Valery I. Kuvatov**, professor, Dr. Sci. (Eng) Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Moskovskiy prospect 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: kyb.valery@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 15.0.2022, принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 01.02.2022; accepted for publication 21.02.2022.

Научная статья

УДК 656.61

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.002>

## Оценка уровня конструктивной безопасности бортовых перекрытий судов ледового плавания на бифуркационных моделях

М.А. Москаленко<sup>1</sup> [asmsh@rambler.ru](mailto:asmsh@rambler.ru), И.Б. Друзь<sup>1</sup> [druz\\_i\\_b@mail.ru](mailto:druz_i_b@mail.ru)

<sup>1</sup>Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток

**Аннотация.** Северный морской путь (СМП), как транспортный коридор, соединяющий западный и восточный регионы, начинает играть важную роль в экономике России. Объем перевозок по СМП имеет тенденцию к постоянному росту и продлению периода навигации. Создание крупнотоннажных судов высоких ледовых классов, при значительных размерениях превосходящих ширину современных ледоколов, меняет режим судоходства на трассах СМП. Поэтому, можно ожидать увеличения числа ледовых повреждений, как для новых судов, так и для имеющих значительный возраст эксплуатации. Хотя, правила постройки судов постоянно развиваются, введен в обязательную практику «Полярный кодекс», как глава Международной конвенции СОЛАС 74, тем не менее, многие вопросы, касающиеся работы балочных конструкций в составе бортовых перекрытий судов ледового плавания (СЛП) и их влияние на конструктивную безопасность судна остаются недостаточно изучены. Предлагаемые методики носят качественный характер и сложны для применения на практике. Изучение предельных возможностей бортовых перекрытий при действии сосредоточенной ледовой нагрузке проводилось авторами на адекватных математических моделях предельной поверхности в виде макромодели бифуркационных аналогов.

**Ключевые слова:** балки набора, ледовая нагрузка, конструктивная безопасность, предельная прочность, предельная поверхность, ледовое сжатие, ледовое повреждение, бифуркация.

**Для цитирования:** М.А. Москаленко, И.Б. Друзь Оценка уровня конструктивной безопасности бортовых перекрытий судов ледового плавания на бифуркационных моделях Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 18—23

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.002>

## Assessment of the level of structural safety of the side floors of ice navigation vessels on bifurcation models

Mikhail A. Moskalenko<sup>1</sup> [asmsh@rambler.ru](mailto:asmsh@rambler.ru), Ivan B. Druz<sup>1</sup> [druz\\_i\\_b@mail.ru](mailto:druz_i_b@mail.ru)

<sup>1</sup>Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Russian Federation

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** Repair of cracks in the ship plates is the most responsible and complex operation. The task of obtaining the specified dimensions of the melt on the reverse side of the welded metal is sharply complicated in cases where access to the reverse side of the seam is difficult or even impossible, the implementation of double-sided welds on the outer skin of the hull of the vessel, in most cases for access to damaged areas, leads to an increase in the number of related works on the dismantling (installation) of equipment and affects the normative terms of repair of vessels, including when ships are parked in the dock. This paper presents the results of the study of the effectiveness of the technology of repair of cracks in the ship plates, by orienting the welding bath along the damage plane, due to the comb cutting of the damaged area with different geometry of the edges. The results of analytical research and factor experiments assessment of the strength of welded joints with different geometry of comb cutting, with one-sided welding, using different welding materials and varying welding modes. The results of metallographic research (on macro-grinds) of the obtained welded joints are given. Technologically effective parameters of comb cutting of cracks in ship plates are proposed for practical application in ship repair.

**Key words.** Ship plates, welding modes, welded joint, comb cutting, damage repair, unloading of damaged area, cracks, stress concentration.

**For citation:** Mikhail A. Moskalenko, Ivan B. Druz – Assessment of the level of structural safety of the side floors of ice navigation vessels on bifurcation models Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 18—23

Ускоренными темпами идет освоение Северного Морского Пути (СМП) и строительство новейших судов арктических ледовых классов. К 2030 году планируется организация круглогодичной навигации по акватории СМП, а уже к 2024 году Россия намерена увеличить поставки грузов до 80 млн. тонн в год (за последние 5 лет грузопоток по СМП вырос более чем в пять раз). Для достижения столь амбициозных целей придется преодолеть чрезвычайно суровые условия окружающей среды. В

настоящее время невозможно осуществлять навигацию по СМП в восточном направлении более 6 месяцев в году.

Спутниковые карты показывают, что из-за процессов глобального потепления и таяния льда, вдоль Российского побережья стоит тонкий однолетний лед толщиной до 2-х метров, что вызывает достаточно много иллюзий по поводу возможности эксплуатации судов низких ледовых классов и круглогодичной самостоятельной

навигации крупнотоннажных судов, значительных размерений (ширина которых больше ширины современных ледоколов).

Тем не менее, ледовая обстановка может резко меняться, лед в Карском море достигает толщины 2,5–3,5 м., любая остановка судна (тем более крупнотоннажного) приводит к ледовому сжатию корпуса с нагрузками превышающими расчетные. В свое время от ледового сжатия погибли п/х «Моссовет» в 1947 г., т/х «Витимлес» в 1965 г., т/х «Брянсклес» в 1980 г., т/х «Нина Сагайдак» в 1983 г. Ни одна навигация, как правило, не обходилась без серьезных ледовых повреждений корпусов судов при ударах о кромку ледового канала или при ледовом сжатии, ударах и смятии корпуса при проводках ледоколом «на усах» см. рис. 1. Ледовые повреждения корпусов судов всегда связаны с пробоинами, трещинами в пластинах корпуса, остаточными закритическими деформациями набора и обшивки перекрытий.



Рис. 1. Проводка ледоколом в тандеме

Из новейшей истории можно привести такие примеры, как повреждение и гибель т/х «Эксплорер» от удара о льдину у берегов Антарктиды в 2007 г. (см. рис. 2).



Рис. 2. Гибель т/х «Эксплорер» 24 ноября 2007 г. у берегов Антарктиды

Ледовое сжатие и заклинивание НИС «Академик Шокальский» в 2013 г. в районе моря Дюрвиля (см. рис. 3), в результате чего судно получило трещину в ширстречном поясе обшивки правого борта значительной длины – в 1,8 м. В ноябре 2021 г. в акватории СМП оказались заблокированы во льдах 20 судов, которые были выведены из ледового плена только с использованием атомных ледоколов.



Рис. 3. Ледовое сжатие НИС «Академик Шокальский» у берегов Антарктиды 24 декабря 2013 г.

На трасах СМП с 2014 г. начал активно меняться режим судоходства, в первую очередь это:

- Изменение интенсивности судоходства;
- Увеличение тоннажа и скорости движения судов (средняя скорость с 4–5 узл. возрастает до 10 узл., в перевозки вовлечены суда 90–180 тыс. тонн дедвейтом, значительных размерений);
- Расширение сети маршрутов, на которых реализуется круглогодичная и продленная навигация;
- Ввод в строй судов способных осуществлять продленную навигацию, двойного действия высоких арктических классов (не ниже Arc7), шириной больше ширины современных ледоколов, двигающихся без проводки ледокола или обкалывающими своим корпусом лед расширяя ледовые каналы. Суда имеют универсальные движители типа – «азипод», систему обмыва корпуса (для уменьшения ледового сопротивления) и способны осуществлять разворот в 2-х метровых однолетних льдах на 360 градусов, для возможности движения судна кормой в тяжелых ледовых условиях см. рис. 6.

Изменение условий и технологии работы судов во льдах, превратили СМП в сложную систему с динамическим изменением характеристик плотности транспортных потоков, что многократно увеличивает риски ледовых повреждений и разливов нефтепродуктов (утечки газового сырья). При описании такой системы (с неэкономической ответственностью) для целей безопасности мореплавания, требуются совсем иные подходы и обобщенные критерии качества, которые мы сформулировали в виде критерия **конструктивной безопасности**, включающего в себя обобщенную характеристику предельной прочности перекрытий корпуса судна и льда, ходкость на различных скоростях, способы движения во льдах и риски опасных состояний.



Рис. 4. Газовоз «Кристоф де Маржер» в сопровождении ледокола «50 лет Победы»



Рис. 5. Ледовое повреждение бортового перекрытия

Например, потеря уровня конструктивной безопасности танкера во льду (см.рис. 5), может не только привести к разливам, с ущербом значительно превышающим стоимость судна, но и скрытым повреждениям набора (например, обрыву книц и т.п.), что может привести к «искрению» и как следствие, пожару взрыву в грузовых танках.

Риски подобного сценария, потери конструктивной безопасности, еще больше возрастают, когда мы имеем дело с супертанкером для перевозки сжиженной природного газа. Так, на современных танкерах двойного действия типа «Ямалмакс» (см. рис. 6) с 2019 г. при движении кормой, для преодоления тяжелых льдов, возникает значительная вибрация, приводящая к малоцикловой усталости и опасному трещинообразованию, с утечкой груза через мембраны грузовых танков, например:

- Танкер газовоз «Георгий Брусилов» в декабре 2019 г. получил трещины длиной от 200 мм. до 1 м. в потолочной мембране грузового танка № 2, что потребовало вывод судна из эксплуатации и аварийный ремонт;
- Танкер газовоз «Борис Давыдов» в мае этого года выводится на аварийный ремонт из за трещин в мембранах грузовых танков № 3 и № 4.
- Танкер газовоз «Владимир Визе» выводится на аварийный ремонт в мае этого года, получив аналогичные повреждения в виде трещин до 430 мм. в мембранах грузовых танков, выявленных после обнаружения утечки груза.



Рис. 6. Танкер двойного действия «Борис Давыдов», движение кормой

Поэтому, научная разработка критериев обеспечения конструктивной безопасности для современных судов ледового плавания (СЛП) приобретает первостепенное значение, для целей безопасной эксплуатации действующих СЛП и проектирования новостроя.

Прогнозируется, что на СМП в ближайшее время появится около 40–50 новых постоянно оперирующих грузовых судов ледового класса и порядка 100–200 судов обслуживающего флота. При таких масштабах освоения СМП можно ожидать резкого увеличения

числа ледовых повреждений корпусов судов, как например, было при работе судов в Восточном секторе Арктики в 80-83 гг., когда уровень повреждаемости превысил средние показатели в 3,7 раза.

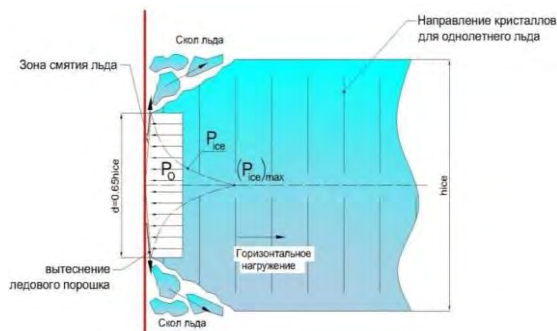


Рис. 7. Схема взаимодействия ледового покрова с прямостенным бортом

При работе крупнотоннажного судна во льдах конструкции корпуса испытывают сложное напряженное состояние. Необходимым условием эксплуатации является безостановочное движение на скоростях не менее 4–6 узлов, любая остановка даже в однолетних льдах толщиной 1,5–2,0 м приводит к сжатию бортового перекрытия, а высвобождение из ледового плена может занимать продолжительное время (более суток, пока не сменится ветер). Риски потери конструктивной безопасности при этом, увеличиваются многократно. Когда вертикальной силы воздействия корпуса на кромку ледового поля не хватает для разрушения ее изгибом, реализуется сценарий взаимодействия прямостенного борта со льдом по схеме разрушения льда смятием [1] см. рис. 7.

Анализ повреждаемости бортовых перекрытий СЛП проведенный авторами по результатам ремонтов более чем за 25-летний период дает ряд закономерностей. Прежде всего, повреждения балок бортового набора свидетельствуют о действии ледовой нагрузки в виде сосредоточенных усилий ближе к средней части пролета (в районе пояса ПВЛ) и работе конструкции в пластической области с потерей стенками балок устойчивости плоской формы изгиба (при этом, для широкополых балок набора отмечается раздельная работа стенки, присоединенных поясков и кницных соединений). Пластические шарниры в балочных конструкциях, при действии сосредоточенной ледовой нагрузки, образуются вначале посередине пролета, а затем на опорах. Ледовые повреждения представляют собой, в основном, остаточные деформации балок с присоединенными поясками обшивки в виде вмятин и выпучин в стенках, потерю устойчивости плоской формы изгиба (или разрушение балки в составе перекрытия по 3-х шарнирной схеме – статическим изломом для высокопрочных сталей при низких температурах). Остаточные деформации конструкций корпуса СЛП, подтверждают правильность подходов к оценке прочности с использованием жесткопластической модели и критерия предельной прочности. Данные расчетные модели вошли в правила Российского морского регистра судоходства, во многом благодаря трудам Ю.А. Шиманского, И.Л. Диковича, Л.М. Беленького и Е.М. Апполонова [2]. Решения по теории предельного

равновесия, полученные в балочной идеализации позволяют уточнить выражения для функций предельных поверхностей в координатах интегральных силовых факторов. Балочная идеализация, как объект оценки конструктивной безопасности при переходе подкрепленной конструкции перекрытия в предельное состояние, с потерей устойчивости плоской формы изгиба, позволяет применять математические модели теории бифуркаций, что невозможно сделать для отдельного объемного или оболочечного конечного элемента. В последнее время все чаще прочность тонкостенных конструкций оценивают по критерию дельной прочности [2]. При этом мерой предельной прочности конструкции принято считать потенциальный запас ее несущей способности на случай действия возможных экстремальных нагрузок. Между тем, используемые для судовых конструкций стали обладают достаточными запасами пластичности [3], а надлежащее оформление конструкций обеспечивает необходимый уровень устойчивости их равновесного состояния. Поэтому в расчетах прочности принимается допущение, что несущая способность судовых конструкций полностью исчерпывается только при достижении в материале элементов конструкций пластической стадии [2,4].

Учет пластических свойств материалов позволяет выявить действительные запасы прочности, которыми обладают конструкции по отношению к состоянию фибровой текучести. Так, по данным Г.В. Бойцова [5], запас прочности, рассчитанный по предельным нагрузкам составляет от 20 % до 100 % и выше. Однако, применение критерия предельной прочности (даже в обоснованных случаях) сдерживается только из-за отсутствия единого практического метода расчета сложных судовых конструкций за пределом упругости. Обычно предельные нагрузки находят с помощью так называемых уравнений «предельных кривых», определяющих взаимное влияние изгибающего момента и перерезывающей силы при различных напряженно-деформируемых состояниях, в том числе, и предельных [4]. В общей форме уравнение предельной поверхности может быть представлено в виде, предложенном Г.С. Писареню [6] и Ю.В. Головешкиным [7]:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, q_i) = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – главные нормальные напряжения рассматриваемом сечении;  $q_i$  – некоторая функция деформаций, зависящих от числа циклов, времени и температуры погружения инструкции.

Применение тех или иных соотношений между компонентами напряжений в (1) зависит от используемой в расчете одной из известных теорий предельного равновесия, но не учитывает неодинаковость сопротивления материала возникновению предельного состояния при растяжении и сжатии [7]. Следует заметить, что то или иное состояние материала зависит, в основном, от геометрии конструкции и типа напряженно-деформируемого состояния. Поэтому заранее установить какую из теорий следует принимать

довольно сложно [8]. Наиболее часто в расчетах используют обобщенное уравнение, учитывающее влияние перерезывающих сил и изгибающих моментов. Уравнение предложено А.А. Гвоздевым [4] в виде следующей суперэллиптической зависимости

$$(M / M_0)^{\alpha_1} + (N / N_0)^{\alpha_2} = 1, \quad (2)$$

где  $M$  и  $N$  – изгибающий момент и перерезывающая сила, действующие в расчетном сечении;  $M_0$  – предельный изгибающий момент, действующий в расчетном сечении при чистом сдвиге;  $\alpha_i$  – коэффициент, зависящий от геометрии конструкции.

Нами исследована устойчивость и типы бифуркаций модели (2). Для этого была произведена редукция к локальной форме дифференциального уравнения

$$\dot{M} = F(M_0, M, N_0, N) \quad (3)$$

с учетом некоторого внешнего возмущения. Тогда в общем виде уравнение (3) можно записать как

$$\dot{Y} = f(Y(t), Y(t - \nu)) + X(t). \quad (4)$$

Полученное уравнение (4), представляет собой математическую конструкцию стандартной управляемой системы с обратной связью, реагирующей на выходной сигнал с запаздыванием  $\nu$ . Если допустить, что нормальное функционирование системы соответствует особой точке  $Y(t) = 0$ , то при уровне воздействия  $X(t)$  система в состоянии обрабатывать их по схеме:  $Y(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow 0$ . Простейшей моделью, адекватно отвечающей данной системе является уравнение (2) с коэффициентами  $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$ .

Нами установлено, что еще до достижения предельного состояния на поверхности конструкций могут появляться явные признаки потери устойчивости плоской формы изгиба, недопустимые по условиям обеспечения конструктивной безопасности судна. При прогрессирующем возрастании деформации можно отметить переломный момент заметного увеличения скорости деформации, опережающей скорость нагружения. Этот момент характеризует приближение конструкции к состоянию пластичности. Замечено также, что в критической точке происходит скачкообразный переход от упругого состояния к пластическому (без явно выраженной фибровой текучести).

Наши исследования, направленные на выяснение принципиальной стороны явления неустойчивости поврежденных корпусных конструкций и корпуса СЛП, в целом, показали допустимость использования методологии теории бифуркаций для адекватного описания выявленных особенностей и определения предельных нагрузок.

Практическое использование результатов исследования состоит в создании управляемой системы с обратной связью. В ней управляющий сигнал определяет параметры подкрепления тех конструкций корпуса, которые имеют ограниченную несущую способность.

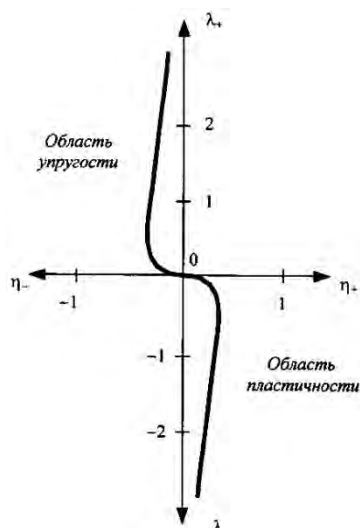


Рис. 8. Катастрофическое изменение состояния системы

Математическая модель этой системы, выраженная через приращение  $\Delta V$  потенциальной функции, записывается в таком виде:

$$\Delta V = \eta^4 + \lambda^2 \eta^2 + \lambda \eta. \quad (5)$$

Здесь обозначено  $\eta = P_{кр} / P$ ,  $P$  – действующая на конструкцию нагрузка;  $P_{кр}$  – критическое значение действующей нагрузки, при которой конструкция будет находиться в предельном (критическом состоянии неустойчивого равновесия) равновесии.

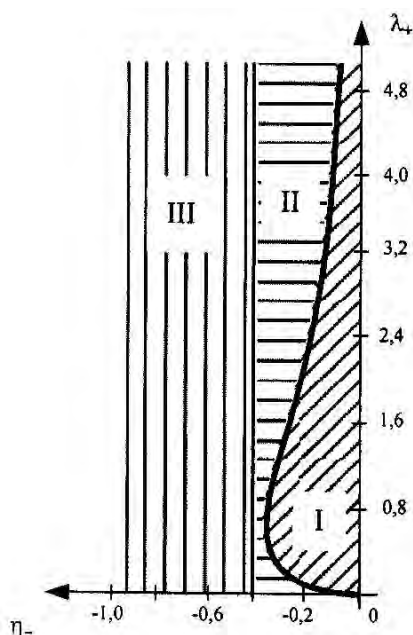


Рис. 9. Диаграмма управления конструктивной безопасностью судна

Результаты теоретических исследований представлены графически на рис. 8 и 9. Графики

построены по данным численной реализации зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} U &= 4\eta^3 + 2\lambda^2\eta + \lambda; \\ U' &= 12\eta^2 + 2^2. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### Выводы

Расшифровка зависимостей (6) позволила выявить качественно новые и неожиданные закономерности. Прежде всего, нам удалось, в рамках критерия бифуркации процесса деформирования, установить особый вид ветвления (см. рис. 8) процесса перехода конструкции из упругого в пластическое состояние. Наряду этим выявлены границы областей пространства управления конструктивной безопасностью судна, представленные на диаграмме (см. рис. 9). Указанная диаграмма может служить инструментом для оценки технического состояния балочной конструкции и принятия решений относительно ремонта или установления эксплуатационных ограничений для конструкции корпуса или судна.

Чтобы войти в диаграмму (см. рис. 9) нужно произвести диагностику технического состояния конструкций корпуса судна и определить значения параметров  $\lambda_0$  и  $\eta_0$ . По этим данным на диаграмме выполняют оценку и принимают решения, руководствуясь следующими производственными правилами:

1. Если точка с координатами  $(\lambda_0, \eta_0)$ , находится в области I, то вероятность разрушения оцениваемой конструкции (или корпуса судна) очень высока. Это объясняется тем обстоятельством, что в данной области пространство характеризуется сочетанием двух отрицательных факторов: ростом действующей нагрузки и отсутствием соответствующего запаса несущей способности конструкции. По нашим наблюдениям сделан вывод, что на практике в подобных случаях (при наложении двух факторов) всегда реализуется закономерный исход – происходит катастрофа. Например, может произойти разрушение отдельной инструкции или корпуса судна в целом по типу статического излома. В этом случае принимаемое решение не может быть однозначным.

2. Если точка с координатами  $(\lambda_0, \eta_0)$  находится в области II, то, чтобы избежать разрушения, необходимо изменить район плавания, или уменьшить грузоподъемность судна. Эти меры позволяют ограничить максимально допустимые значения действующей на судно внешней нагрузки.

3. Если по данным дефектации корпуса судна точка с координатами  $(\lambda_0, \eta_0)$  находится в области III, то конструкцию целесообразно подкрепить.

4. Если предполагается эксплуатировать судов более суровых ледовых условиях, то необходимо произвести модернизацию корпуса. Этот случай соответствует на диаграмме (см. рис. 9) области пространства управления конструктивной безопасностью со значениями  $|\eta| > 1,0$ .

### Литература

1. Сборник нормативно-методических материалов РМРС, Книга двадцать пятая. НД №2-139902-30. г. Санкт-Петербург, 2017. – 62с.
2. Апполонов Е.М., Таровик О.В. Предельные нагрузки и упругопластические деформации судовых балочных конструкций. СПб: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2012. 128 с.





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

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.003>

### Сравнительный анализ параметров взаимодействия судов с грунтом

Хиеп Чунг Фам<sup>1</sup> [phiepast07@gmail.com](mailto:phiepast07@gmail.com), В.А. Кулеш<sup>2</sup> [vkulesh@mail.ru](mailto:vkulesh@mail.ru)

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет, <sup>2</sup>Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского

**Аннотация.** Взаимодействия судов с грунтом происходят сравнительно часто. Сценарии взаимодействия судов с грунтом бывают как аварийные, так и эксплуатационные. Аварии с посадкой судов на грунт чаще связаны с навигационными ошибками. Следствиями таких аварий являются большие материальные потери, экологические катастрофы и даже гибель судов и людей. Эксплуатационные сценарии связаны с плановыми посадками судов на грунт для проведения грузовых операций на необорудованный берег, отвечающими определённым условиям безопасности. Такие грузовые операции имеют особую важность и актуальны для обширного побережья северных и дальневосточных морей России, где строительство причальных сооружений экономически не оправдано. При любом сценарии оценка параметров взаимодействия судов и грунта важна и актуальна. В работе выполнены сравнения результатов оценки параметров взаимодействия судов с грунтом, полученных как в экспериментах, так и по разным методикам. Основное внимание уделено сравнению методики авторов. Результаты сравнений показали, что методика авторов обеспечивает адекватную оценку основных параметров взаимодействия.

**Ключевые слова:** корпус судна, взаимодействие с грунтом, сравнения параметров

**Для цитирования:** Фам Чунг Хиеп, Кулеш В.А. Сравнительный анализ параметров взаимодействия судов с грунтом. Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 24—29

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.003>

### Comparative analysis of parameters of vessels interaction with the ground

Hiep Trung Pham<sup>1</sup> [phiepast07@gmail.com](mailto:phiepast07@gmail.com), Victor A. Kulesh<sup>2</sup> [vkulesh@mail.ru](mailto:vkulesh@mail.ru)

<sup>1</sup>Far Eastern Federal University, <sup>2</sup>Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** The interaction of vessels with the ground occurs also relatively. Scenarios of vessels interaction with the ground are accidental and operational. Vessel grounding are more often associated with navigation errors. The consequences of such accidents are large material losses, environmental disasters and the loss of vessels and human. Operational scenarios related to planned vessel grounding for cargo operations on an unequipped shore that meets certain safety conditions. Such cargo operations are especially important and relevant for the extensive coastline of the northern and Far Eastern seas of Russia where the construction of berthing facilities is not economically justified. In any scenario, the assessment of the parameters of vessel interaction with the ground is important and relevant. The paper compared the results of assessing the parameters of vessel interaction with the ground, which obtained in experiments and using different methodologies. The main attention is given to the comparison of the authors' methodology. The results of the comparisons showed that the authors' methodology provides an adequate assessment of the main interaction parameters.

**Keywords:** vessel hull, interaction with the ground, comparison of parameters

**For citation:** Hiep Trung Pham, Victor A. Kulesh Comparative analysis of parameters of vessels interaction with the ground, Marine intellectual technologies. 2022.Part. 1, no. 1. P. 24—29

#### Введение

В настоящее время безопасность мореплавания остаётся актуальной проблемой. Статистические данные по авариям и гибели судов показывают, что за период 2014-19 гг. произошло более 13200 аварийных случаев, среди которых аварийные взаимодействия судов с грунтом занимали около 13% [1]. Следствиями таких происшествий являются огромные материальные потери, экологические проблемы, гибели судов и людей [2].



Рис. 1. Танкер Wakashio на грунте [3].

На рис. 1 показана одна из последних аварий, связанная с посадкой на грунт. Японский танкер *Wakashio* сел на мель в июле 2020 г. у побережья Республики Маврикий. Разлив нефти с танкера составил более тысячи тонн [3].

После таких аварий корпус судна может получить серьезные повреждения (см. рис. 2) и даже переломиться.



Рис. 2. Повреждения днища танкера [4].

Эксплуатационные сценарии связаны с плановыми посадками судов на грунт для проведения грузовых операций на необорудованный берег, отвечающих определенным условиям безопасности [5]. Для таких операций, как правило, используют специализированные суда, например типа «Сосновка» проекта DCV47 Морского Инженерного Бюро для снабжения отдаленных населенных пунктов Камчатки [6].

Особые сценарии с посадками на грунт относятся к случаям, когда списанные суда выбрасывают на специальный пляж для последующей утилизации (см. рис. 3) [7]. Здесь повреждения днища не важны при условии отсутствия переломов корпуса и загрязнения моря.



Рис. 3. Утилизация судов в Пакистане [7].

Исследования параметров взаимодействия судов с грунтом важны и актуальны при всех сценариях. Работы в этом направлении ведутся как за рубежом, так и в России, включая авторов. Целью данной работы является сравнение методики авторов [8] и результатов других исследований.

### 1. Алгоритм расчётов

Алгоритм расчётов в квазистатической постановке [8], реализованный в виде программы «ShipGround», сводится к решению уравнения энергетического баланса во времени

$$m \cdot (1 + \mu) \cdot v_N^2 / 2 = \Delta_N \cdot \Delta d + E_T + E_C, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент присоединённой массы;  $\Delta_N \cdot \Delta d$  – потенциальная энергия всплытия судна;  $E_T$  – энергия на преодоление сил трения;  $E_C$  – энергия разрушения (смятия) грунта.

Решение производится путём интегрирования на малых (заданных) интервалах перемещений и оценки приращений слагаемых энергии.

Приращение энергии на преодоление сил трения в функции от коэффициента трения и концевой реакции взаимодействия с грунтом на соответствующем перемещении

$$E_T = \int_s k_F R_N(s) ds. \quad (2)$$

Приращение энергии на смятие грунта в функции от разрушенного объёма грунта

$$E_C = R_0 \iiint_V F(x, y, z) dx dy dz, \quad (3)$$

где  $R_0$  – сопротивление грунта (напряжения смятия).

Условие, ограничивающее глубину внедрения корпуса, с учетом угла наклона грунта имеет вид

$$P \leq R_N \cos \psi_N. \quad (4)$$

При этом учитывается заложенная в Правила РС формула, связывающая давления сопротивления грунта с площадью зоны контакта –  $A$

$$p = 10d_N(1 + 4 / \sqrt{A}). \quad (5)$$

Она позволяет записать условие (4) в виде

$$10d_N(A + 4 \cdot \sqrt{A}) \leq \Delta_N \frac{x \cdot \operatorname{tg} \psi_N - h_z}{7d_N} \cos \psi_N. \quad (6)$$

В результате площадь зоны контакта в функции от  $h_z$  – проекции глубины внедрения на ось  $Z$

$$A \cong h_z^2 / (\operatorname{tg} \beta \cdot \sin \psi_N). \quad (7)$$

В работе [8] представлены результаты расчетов кинематических и силовых параметров взаимодействия судов с грунтом. Однако, объем сравнений с другими источниками ограничен.

### 2. Модельные эксперименты

Рассматриваемые модельные эксперименты выполнены в 1994 году, а их результаты отражены в работах [9, 10]. В экспериментах использован бассейн (рис. 4) с классической системой для оценок буксировочного сопротивления моделей, включающей тележку. Модель в такой системе не является свободной для естественного погашения собственной кинетической энергии в процессе взаимодействия с грунтом. Принудительное поступательное движение и инерция тележки

должны приводить к превышению естественной дистанции торможения.

Модель массой  $m = 78,4$  кг имела длину 2,57 м. Результаты экспериментов приведены для 3-х скоростей движения, которые в пересчете модели на судно длиной 100 м составляют от 3,2 до 8,1 узлов и показывают, что задачи экспериментов были ближе к аварийным сценариям.

Конструкция модели включала отдельный носовой блок, в месте шарнирного соединения которого с остальным корпусом располагался динамометр. Песочный грунт имел уклон 1:6, что соответствует  $9,5^\circ$  и также не характерно для нормальной эксплуатации. Одной из главных задач экспериментов было изучение первичного импульса, т.е. динамической реакции носового блока. Эксперименты сопровождались сравнительными расчетами. Результаты сравнений отмечены как очень хорошие.

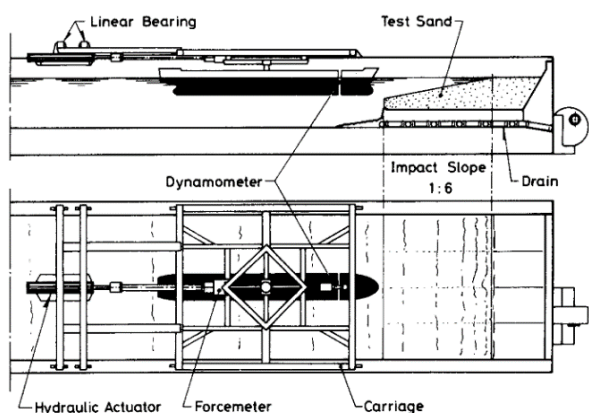


Рис 4. Экспериментальная установка для модельных испытаний [9].

Учитывая, что методика [8] ориентирована на свободное погашение кинетической энергии судна без его связи с тележкой, использование предложенной формулы реакции взаимодействия

$$R_{0N} \cong (1 + \mu) \frac{\Delta_N V_N^2}{8gd_N}, \text{ где } \mu = \frac{\pi d_N^2 L \gamma_w}{4\Delta_N} \quad (8)$$

не имеет смысла. Расчеты показывают, что в свободном состоянии модель проходит дистанцию до остановки порядка 0,28 м при скорости 0,664 м/с. В экспериментах дистанция торможения более чем 3-кратно превышает указанную, см. рис. 5.

Для учета условий таких экспериментов на основе методики [8] вертикальную носовую реакцию в функции от координаты –  $x$  можно представить

$$R_z(x) = m \cdot g \cdot (1 + \mu) \frac{x \cdot \operatorname{tg} \psi}{7 \cdot d} \quad (9)$$

где  $m$  - масса модели;

$\mu$  - коэффициент присоединённых масс, см. (8);

$\psi$  - угол наклона поверхности грунта;

$d$  - осадка модели (на миделе).

Формула (9) не учитывает свойства грунта, форму корпуса в зоне контакта и его погружение в грунт, т.е. представляет оценку сверху. Её сравнение с 2-мя испытаниями и расчетами авторов эксперимента дано на рис. 5.



Рис. 5. Результаты экспериментов [9] при скорости модели 0,664 м/с и сравнения.

Согласование за пределами импульсов хорошее. Динамические расчёты авторов экспериментов также выходят практически на прямую линию при координатах более 50 см. Обращает внимание и вызывает вопросы наличие 2-х пиков в районе координат 10 и 25 см. При этом в последнем случае пик вывеляют расчёты и лишь одно из испытаний. Экспериментальные пики заметно выше расчётных - в 1,4 раза и могут быть связаны со спецификой подвижности носового блока модели.

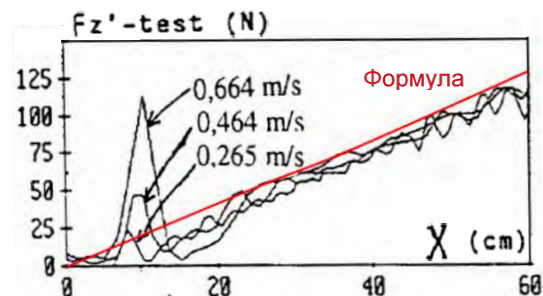


Рис. 6. Результаты экспериментов [10] при разных скоростях и сравнение с формулой (9).

Дополнительные сравнения даны на рис. 6. Здесь согласование с формулой (9) имеет тот же порядок. Важно заметить, что вторичные пики в районе 25 см уже отсутствуют. При меньшем из значений скорости (0,265 м/с) амплитуда динамического пика мала и может не приниматься во внимание. В целом для обсуждения динамики колебаний носового блока конкретной модели данных источника недостаточно.

Сопоставления показали, что методика [8] позволяет адекватно оценивать усилия при небольших скоростях, а для высоких скоростей за пределами первичного импульса.

### 3. Натурные эксперименты

Для проверки описанных модельных испытаний и разработки математической модели по заказу компании *Great Belt Link Ltd* была проведена серия натурных испытаний в Дании. Условия и результаты испытаний опубликованы в работе [11]. Для испытаний выбрано рыболовное судно *Charlotte Vest* длиной 29,6 м, водоизмещением 299 тонн с V-образной формой носовой оконечности.

Судно во время испытаний не имело дифферента. Испытания проводились путем

десантирования судна на выбранный пляж в разных местах при скоростях движения от 2 до 5,5 м/с. На судне были установлены приборы записи углов, скоростей и ускорений. Перед каждым испытанием выполнялись замеры профиля поверхности грунта и брались его пробы. Но данные о прочности грунта в публикациях отсутствуют.

После испытаний, кроме вертикальных и горизонтальных ускорений оценивались параметры деформаций грунта в носовой части судна и дистанции торможения. На основе уравнений движения судна рассчитаны скорости, силы взаимодействия, эффективный коэффициент трения и дистанции до остановки. На рис. 7 показано положение судна после испытания № 1. Видно, что часть измерений выполнялась с берега.

Анализ этих натуральных испытаний занял длительный период - в 3 года. Результаты, по мнению авторов, подтвердили механику взаимодействия судна с грунтом, обнаруженную ранее в модельных испытаниях. Однако, графики для усилий (типа представленных рис.5-6) не показаны, а при сравнениях главный акцент сделан не на усилия взаимодействия, а на величины дистанций торможения [11].



Рис. 7. Положение судна после испытания № 1 [11].

Сравнения полученных результатов натуральных испытаний с расчетами по формуле (1) имеют трудности, связанные с ограниченностью опубликованной информации. Из-за отсутствия параметров формы носа датского судна были использованы параметры близкого прототипа - российского сейнера проекта 388 длиной 30 м и водоизмещением 324 тонн (см. рис. 8). Углы килеватости приняты  $47^\circ$  - в среднем для зоны контакта в районе форпика 6-10 шп.

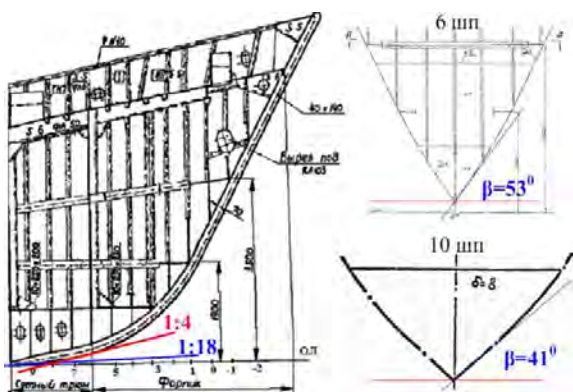


Рис. 8. Форма носа сейнера проекта 388 и углы.

Сравнения натуральных испытаний и расчетов по формуле (1) в части дистанций торможения даны в табл. 1. Из-за неопределенности прочности грунта в экспериментах для расчетов было принято среднее значение прочности - 350 кН/м<sup>2</sup>. Коэффициент трения принят также в среднем - 0,714, а углы наклона грунта - максимальные замеренные значения в каждом испытании.

Таблица 1

| № | V<br>м/с | Наклон<br>(макс.) | Натурн.<br>экспер. | Расчет<br>по (1) | Сравн. |
|---|----------|-------------------|--------------------|------------------|--------|
| 1 | 2,5      | 1:12              | 9.6                | 10.2             | 1,06   |
| 2 | 5,1      | 1:9               | 16.4               | 21.5             | 1,31   |
| 3 | 5,1      | 1:4               | 12.1               | 11.7             | 0,97   |
| 4 | 4,1      | 1:4               | 8.1                | 9.0              | 1,11   |
| 5 | 4,1      | 1:10              | 16.6               | 17.7             | 1,06   |
| 6 | 5,0      | 1:8               | 17.3               | 19.3             | 1,12   |

Как видно, для дистанций торможения значения по формуле (1) согласуются и в среднем на 10% больше экспериментальных значений.

#### 4. Сравнения с расчетами

Наличие в работе [11] данных с результатами расчётов дистанций торможения судна позволяет выполнить дополнительные сравнения с формулой (1). Результаты сравнений даны в табл. 2.

В среднем расчеты по формуле (1) дают значения на 14% больше. Следует отметить, что в расчетах [11] коэффициент трения выбирался авторами для каждого испытания дифференцированно из сравнительно широкого диапазона 0,6-0,8. Такой приём вызывает вопросы и мог применяться авторами для снижения отличий их расчетов с собственными экспериментами.

Таблица 2

| V<br>м/с | Наклон<br>грунта | Расчет<br>в [11] | Расчет.<br>по (1) | Сравн. |
|----------|------------------|------------------|-------------------|--------|
| 2,5      | 1:12             | 10.9             | 10.2              | 0,94   |
| 4,1      | 1:4              | 8.3              | 9.0               | 1,08   |
| 4,1      | 1:10             | 14.7             | 17.7              | 1,20   |
| 5,0      | 1:8              | 16.7             | 19.3              | 1,16   |
| 5,1      | 1:4              | 9.9              | 11.7              | 1,18   |
| 5,1      | 1:9              | 16.6             | 21.5              | 1,30   |

На рис. 9 показано другое сравнение - расчетов изменения кинетической энергии судна водоизмещением 4400 тонн вдоль дистанции торможения по работе [11] и формуле (1) (красный цвет). Условия приняты как в работе [11] - скорость судна 10 узлов, грунт с уклоном 1:6,5, что соответствует  $8,8^\circ$ , коэффициент трения равен 0,6.

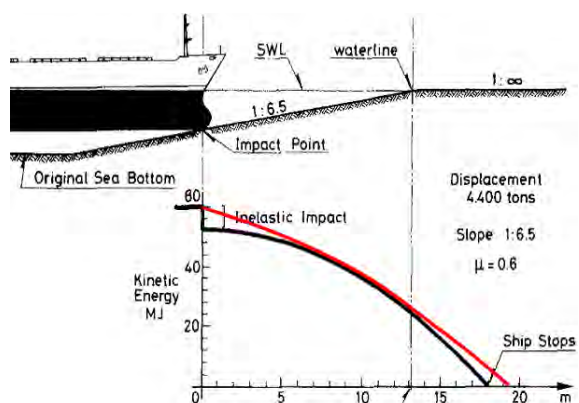


Рис. 9. Сравнение изменений кинетической энергии судна вдоль дистанции торможения.

В работе [11] используется методика со скачкообразным изменением кинетической энергии в начальной фазе контакта. Скачок связывается с первичным импульсом, полученным на модели с подвижным носовым блоком (рис. 4 и рис.6). Дальнейшее изменение кинетической энергии плавное. Методика [8] и формула (1) основана на квазистатической постановке и здесь изменение кинетической энергии плавное на всей дистанции торможения. Как видно, оценки дистанций торможения судна достаточно близкие – отличие 8%.

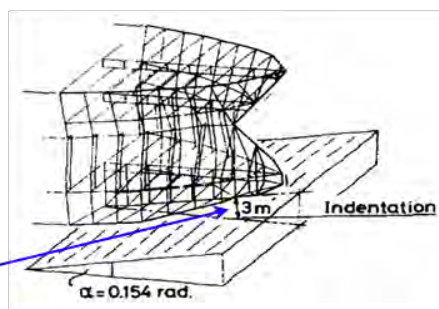
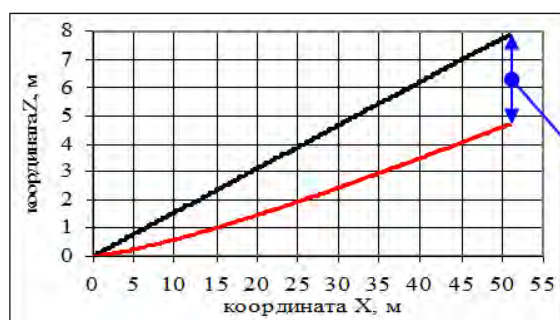


Рис. 10. Сравнение расчётов по формуле (1) с результатами [9] для танкера водоизмещением 177 000 тонн.

Как отмечено ранее, задача об аварийном взаимодействии судов с грунтом особенно актуальна для крупных танкеров из-за возможных катастрофических экологических последствий. Сравнение дистанции торможения и глубины внедрения носа танкера в грунт дано на рис. 10.

Расчеты выполнены для крупного танкера водоизмещением 177 тыс. тонн, длиной 274 м при скорости 7,5 м/с и соответствуют расчётам в работе [9]. Приняты значения: коэффициент трения – 0,7, угол килеватости –  $10^0$ , сопротивление грунта - 600 кПа. Траектория движения носа судна показана на рис.10 (слева, красным цветом). Здесь дистанция до остановки судна составила 51 м, при этом глубина внедрения носа в грунт достигла 3,18 м, что на 6%

больше, чем получено в работе [9] (см. рис.10, справа).

### Заключение

Результаты приведённых сравнений дополняют сопоставления, выполненные в работе [8], и показывают хорошие согласования расчетных параметров взаимодействия судов с грунтом не только на малых, но и на высоких скоростях движения судов.

Результаты работы могут использоваться как для проектирования новых специализированных судов, так и для анализа аварийных сценариев судов в эксплуатации, например путем рекомендаций и инструкций капитанам по ограничениям скоростей движения судов в условиях мелководья.

### Литература

1. Annual overview of marine casualties and incidents 2019 [Электронный ресурс]. – URL: <http://emsa.europa.eu>. (дата обращения: 25.11.2020).
2. Кацман Ф.М., Ершов А.А. Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства // Журнал «Транспорт Российской Федерации». (№5). Санкт-Петербург, 2006, с. 82-84.
3. The Japanese-owned MV Wakashio ran aground [Электронный ресурс]. – URL: <https://english.siyathanews.lk/> (дата обращения: 26.01.2021).
4. T. Kuroiwa, Number simulation of actual collision and grounding accident. In Int. Conference on design and methodologies for Collision and Grounding Protection of ships. San Francisco, 1996. p. 7.1 -7.12.
5. Кулеш В.А., Азовцев А.И. Опыт приведения судна к условиям класса NAABSA (посадка на грунт) // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т. 2, № 1(47). С. 69–76.
6. Суда снабжения проекта DCV47 типа Сосновка на Камчатке [Электронный ресурс]. – URL: <http://mcb.com.ua/news/news.html832>. (дата обращения: 25.11.2020).
7. Ship breaking [Электронный ресурс]. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ship\\_breaking](https://en.wikipedia.org/wiki/Ship_breaking) (дата обращения: 26.01.2021).
8. Кулеш В.А., Фам Чунг Хиеп. Методика расчета параметров взаимодействия судов с грунтом // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2021. № 3(48). С. 39–48.
9. Pedersen P.T. Ship grounding and hull girder strength. Marine Structures 7 (1994). p. 1-29.
10. Simonsen B.C. Mechanics of Ship Grounding. PhD. thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering. — Technical University of Denmark, 1997. — 265 p.

11. M.J. Sterdorff and P.T. Pedersen. Grounding experiment on soft bottoms. J. Mar. Sci. Technol. 1996. p. 174-181.

#### **References**

1. Annual overview of marine casualties and incidents 2019 [Elektronnyy resurs]. – URL: <http://emsa.europa.eu>. (data obrashcheniya: 25.11.2020).
2. Katsman F.M., Ershov A.A. Avariynost' morskogo flota i problemy bezopasnosti sudokhodstva [Emergency of the marine fleet and problems of safety of navigation ]. Zhurnal «Transport Rossiyskoy Federatsii». (№5). Sankt-Peterburg, 2006, s. 82-84.
3. The Japanese-owned MV Wakashio ran aground [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://english.siyathanews.lk/> (data obrashcheniya: 26.01.2021).
4. T. Kuroiwa, Number simulation of actual collision and grounding accident. In Int. Conference on design and methodologies for Collision and Grounding Protection of ships. San Francisco, 1996. p. 7.1 -7.12.
5. Kulesh V.A., Azovtsev A.I. Opyt privedeniya sudna k usloviyam klassa NAABSA (posadka na grunt) [Adaptation experience of ship to the class NAABSA (safely aground)]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. T. 2, № 1(47). S. 69–76.
6. Suda snabzheniya proekta DCV47 tipa Sosnovka na Kamchatke [Supply vessels of DCV47 project of Sosnovka type in Kamchatka]. – URL: <http://mcb.com.ua/news/news.html?832>. (Data obrashcheniya: 26.01.2021).
7. Ship breaking [Elektronnyy resurs]. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ship\\_breaking](https://en.wikipedia.org/wiki/Ship_breaking) (data obrashcheniya: 26.01.2021).
8. Kulesh V.A., Pham Trung Hiep. Metodika rascheta parametrov vzaimodeystviya sudov s gruntom [Method for calculating the parameters of vessels interaction with the ground]. Vestnik Inzhenernoj shkoly DVFU. 2021. № 3(48). s. 39–48.
9. Pedersen P.T. Ship grounding and hull girder strength. Marine Structures 7(1994). p. 1-29.
10. Simonsen B.C. Mechanics of Ship Grounding. PhD. thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering. – Technical University of Denmark, 1997. – 265 p.
11. M.J. Sterdorff and P.T. Pedersen. Grounding experiment on soft bottoms. J. Mar. Sci. Technol. 1996. p. 174-181.

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

**Хиеп Чунг Фам**, аспирант департамента Морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: [phiepast07@gmail.com](mailto:phiepast07@gmail.com)

**Виктор Анатольевич Кулеш**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Теории и устойчивости судна, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: [vkulesh@mail.ru](mailto:vkulesh@mail.ru)

**Hiep Trung Pham**, graduate student of the Marine Engineering and Transport Department at Far Eastern Federal University, 8, Sukhanova st., Vladivostok, 690950, e-mail: [phiepast07@gmail.com](mailto:phiepast07@gmail.com)

**Victor A. Kulesh**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Naval architecture department, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya st., Vladivostok, 690059, Russian Federation, e-mail: [vkulesh@mail.ru](mailto:vkulesh@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 19.10.2021; одобрена после рецензирования 01.11.2021, принята к публикации 15.01.2022.

The article was submitted 19.10.2021; approved after reviewing 01.11.2021; accepted for publication 15.01.2022.

## ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Научная статья

УДК 539.374

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.004>

#### Исследование локального комбинированного теплового воздействия на получение неразъемных соединений

Е.Е. Абашкин<sup>1</sup> abashkine@mail.ru, А.В. Ткачева<sup>1</sup> 4nansi4@mail.ru

<sup>1</sup>Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

**Аннотация** В работе исследуется воздействие локального теплового перегрева зоны соединения толстостенной пластины, осуществляемое с помощью электродуговой сварки с порошковой проволокой из алюмотермитного наполнителя, а также ее влияние на физико-механические свойства материала по сравнению с традиционной технологией электродуговой сваркой проволокой сплошного сечения. Строится математическая модель деформирования упругопластической пластины, производимого путем нагрева движущегося источника тепла. За основу модели берется модель Прандтля-Рейса, в которой закон Гука заменяется законом Дюамеля-Неймана, а условие Мизеса дополняется функцией деформационного упрочнения Джонсона-Кука. Упругие модули, как и предел текучести, полагаются зависимыми от температуры. Для нахождения коэффициентов функции деформационного упрочнения Джонсона-Кука проводится серия экспериментов на растяжение образцов. Образцы вырезаются из основного металла и сварочного материала шва и деформируются на разрывной машине при различных скоростях, в результате определяется зависимость скорости деформирования и упрочнения.

Решается поставленная термоупругопластическая задача в перемещениях с использованием численного метода сеток и итерационного метода Ньютона. В результате решения задачи строятся эпюры остаточных напряжений как продольных, так и поперечных. Для подтверждения произведенных расчетов проводится эксперимент, в котором с поверхности соединенных пластин, полученных с использованием электродуговой сварки с порошковой проволокой из алюмотермитного наполнителя и традиционной проволокой сплошного сечения, фиксируются остаточные напряжения с помощью агрегата RIGAKU MSF-3M. Экспериментально полученные значения напряжений с небольшим отклонением совпадают с рассчитанными напряжениями, что подтверждает построенную математическую модель и позволяет судить о характере напряженного состояния в материале пластины.

В ходе сравнения полученных результатов делается вывод, что применение электрода в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем, представляется предпочтительным в сравнении с вариантами получения неразъемного соединения проволокой сплошного сечения.

**Ключевые слова:** электродуговая сварка, алюмотермитная проволока, J2 теория, функция упрочнения Джонсона-Кука

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Хабаровского федерального научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

**Для цитирования:** Абашкин Е.Е., Ткачева А.В. Исследование локального комбинированного теплового воздействия на получение неразъемных соединений, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 30—36

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.004>

#### Study of Local Combined Heat Impact on Permanent Joints

Evgeny E. Abashkin<sup>1</sup> abashkine@mail.ru, Anastasia V. Tkacheva<sup>1</sup> 4nansi4@mail.ru

<sup>1</sup>Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science, Khabarovsk Territory, Komsomolsk on the Amur, Russian Federation

**Abstract.** The paper studies the impact of local overheating of thick plate joining area with arc welding using flux-cored wire with aluminothermic filler as well as its impact on physical and mechanical properties of material in comparison to the traditional arc welding using solid wire. A mathematical model is made for elastoplastic plate deformation due to the heat from a moving source. The model is based on the Prandtl-Reuss model where Hooke's law is replaced with Duhamel-Neumann's law and Von Mises condition is modified with Johnson-Cook strain-hardening function. Elastic moduli as well as yield stress are assumed to depend on temperature. A number of tensile strength experiments is performed to obtain Johnson-Cook strain-hardening function coefficients. Samples are cut from the base metal and weld filler material and deformed on a tensile testing machine at varying speeds. This determines the connection between deformation and hardening speeds.

The thermo-elastic-plastic problem is solved by movements applying numerical grid method and Newton's iterative method. As the result of solving the problem, diagrams of residual stresses (both axial and lateral) are plotted. An experiment has been performed to confirm the calculations conducted where RIGAKU MSF-3M unit detects residual stresses on the surface of plates welded with arc welding using flux-cored wire with aluminothermic filler as well as traditional arc welding using solid wire. Experimentally obtained stresses only slightly deviate from the calculated stresses which confirms the plotted mathematical model and allows to make conclusions on the characteristics of plate material stress state.

A conclusion is made in the course of comparing the obtained results that using flux-cored wire electrode with aluminothermic filler is preferable to permanent joining using solid wire.

**Keywords:** arc welding, aluminothermic wire, J2 theory, Johnson-Cook strain-hardening function

**For citation:** Abashkin E.E., Tkacheva A.V. Study of Local Combined Heat Impact on Permanent Joints, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 30—36

## Введение

В отрасли промышленного производства самым распространённым методом получения неразъёмного соединения металлоконструкций является электродуговая сварка, для получения которого требуется жёсткое соблюдение режимов теплового воздействия в процессе локального оплавления и последующее охлаждение зоны соединяемых элементов. Локальный перегрев зоны соединения приводит к негативным образованиям закалочных структур в зоне термического влияния сварочного шва. Среди методов, направленных на снижение этого процесса, широкое распространение получили механические или тепловые способы воздействия, характеризующиеся предварительным подогревом зоны соединения и последующей термической обработкой после сварки [1].

Для решения этой проблемы предлагается использовать порошковую проволоку с алюмотермитным наполнителем для электродуговой автоматической сварки под слоем флюса. Наполнитель такой проволоки состоит из смеси фракций металлической окалины и алюминиевого сплава с добавлением легирующих компонентов. Значительная доля компонентов порошкового наполнителя является вторичным сырьём промышленного производства [2]. Применение данной порошковой проволоки обусловлено возможностью внесения доли тепла в процесс локального нагрева зоны соединения деталей за счет экзотермической окислительно-восстановительной реакции, в ходе которой происходит восстановление железа из окалины с получением наплавочного материала [3-4]. Таким образом, реализуется возможность использования энергии электрической дуги и алюмотермитной реакции в ходе получения неразъёмного соединения. Дополнительная тепловая энергия экзотермической реакции и образующийся металл предположительно будут способствовать равномерному наполнению сварочной ванны. Теплоизоляционные свойства образовавшегося шлака, в свою очередь, приводят к уменьшению теплоотвода с поверхности сварного шва, тем самым увеличивают зону прогрева основного металла, способствуя более медленному и, соответственно, равномерному затвердеванию (кристаллизации) материала шва, что оказывает благоприятные воздействия на образование мелкозернистой структуры материала. Это улучшит качество получаемых неразъёмных соединений по сравнению с «традиционной» электродуговой сваркой проволокой сплошного сечения.

Материал сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) по своему строению отличается от основного металла, поэтому проводились исследования этих зон, которые установили изменения физических параметров. Предел текучести в зоне шва выше, чем в основном металле, что свидетельствует об упрочнении металла. Поэтому при математическом моделировании данного технологического процесса сварки следует обращать внимание на эти свойства материала.

В работе рассматривается новый сварочный материал, выполненный с использованием порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем. Термитная сварка применяется в соединении рельсов и подводной сварке [5,6]. Этот вид электродного материала на сегодняшний день не изучен и требует глубокого рассмотрения.

Тепловая энергия электрической дуги при сварке оказывает негативно воздействие на зону термического влияния (ЗТВ). В этой зоне происходят структурные изменения (твердотельные фазовые превращения), влияющие на механические свойства материала упругие модули и предел текучести. Из-за большого температурного градиента в местах сварного шва появляются нестационарные температурные напряжения, приводящие к пластическому течению и образованию необратимых деформаций. После затухания температуры в материале конструкции в зоне термического влияния из-за наличия необратимых деформаций распределение и уровень остаточных напряжений достаточно высокие, что может привести к появлениям трещин и разрушению сварного шва. Разработка способов и методов, способствующих уменьшению остаточных напряжений в материале конструкции, является актуальной задачей для сварщиков, ее невозможно решить без использования математического моделирования самого сварочного процесса.

Математическое моделирование сварочного процесса дает возможность спрогнозировать остаточные напряжения в материале конструкции, сравнить их в зависимости от способов сварки для того чтобы выбрать способ или режим, при котором остаточные напряжения будут минимальны. Поскольку в сварных конструкциях возникают необратимые деформации, то их хорошо описывает модель Прандля-Рейса, в которой закон Гука заменен законом Дюамеля-Неймана, а условие пластического течения Мизеса учитывает деформационное упрочнение, определяемое функцией Джонсона – Кука (Johnson and Cook, 1983). Для того, чтобы математическая модель хорошо описывала процесс сварки, необходимо изучить



механические свойства материала до и после термического влияния.

Целью работы является исследование воздействия локального теплового перегрева зоны соединения металлических конструкций, осуществленного с помощью электродуговой сварки с порошковой проволокой из алюмотермитного наполнителя и ее влияние на свойства материала по сравнению с традиционной технологией получения неразъемных соединений. В дальнейшем электродуговую сварку с проволокой сплошного сечения будем именовать «традиционной» сваркой, а электродуговую сварку с порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем – «экспериментальной» сваркой.

### 1. Математическое и физическое моделирование

В декартовой системе координат  $(x, y, z)$  рассмотрим стальную (Ст3) прямоугольную пластину размерами  $D_x, D_y, D_z$  по поверхности которой прямолинейно с некоторой скоростью  $V$  движется сварной луч. Температура  $T(x, y, z, t)$  в пластине определяется законом теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$\rho$  – плотность,  $c$  – удельная теплоемкость,  $a$  – коэффициент теплопроводности,  $t$  – время.

Начальные и граничные условия, задаваемые на поверхностях пластины, изображены на рис.1:

$$t = 0: T = T_0, \quad T_0 = 20^\circ \text{C};$$

$$t > 0: \quad a \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{S_1, S_2} = \kappa(T_0 - T),$$

$$a \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{S_2, S_4} = \kappa(T_0 - T), \quad a \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{S_5} = \kappa(T_0 - T), \quad (2)$$

$$a \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=Vt} = q + \kappa^*(T_0 - T) + \varepsilon p(T_0^4 - T^4),$$

$$\text{при } t < t^* \quad q = \eta IU;$$

$$\text{при } t^* \leq t, \quad q = 0; \quad (2)$$

$$a \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{S_6} = \kappa(T_0 - T) + \varepsilon p(T_0^4 - T^4),$$

$q = \eta IU$ ,  $\eta$  – к.п.д. источника,  $I$  – сила тока,  $U$  – напряжения источника тока,  $\kappa$  – коэффициент теплообмена,  $\kappa^*$  – коэффициент теплообмена металла и шлаковой корки,  $\varepsilon$  – приведенная степень черноты,  $p = 5.669 \cdot 10^{-8} \text{ Bm} / (\text{M}^2 \text{K}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $V$  – скорость источника,  $L = Vt$  – место сварочного луча,  $S_i$   $i = \overline{1..6}$  площадки (рис. 1),  $t^* = D_y / V$  время прекращения сварки  $q = 0$ .

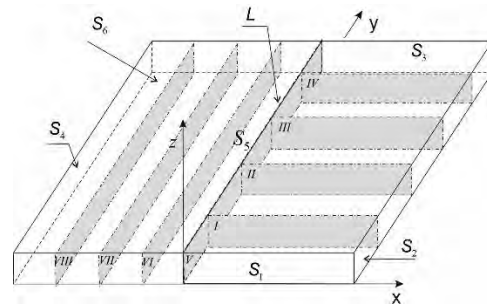


Рис. 1. Схема пластины,  $S_i$   $i = \overline{1..6}$  – площадки, I – VIII – расположение сечений

Не составляет особого труда решить поставленную выше температурную задачу (1) совместно с граничными условиями (2). Считаем, что на каждой временной итерации поле температур известно, перейдем к механической части задачи.

Предполагаем, что вначале в пластине отсутствуют необратимые деформации. Деформации считаем малыми  $d_{ij}$  и складываемыми из обратимых  $e_{ij}$  и необратимых  $p_{ij}$ .

$$d_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) = e_{ij} + p_{ij} \quad (3)$$

Напряжения, упругую деформацию и температуру связывает соотношения Дюамеля-Неймана.

$$\sigma_{ij} = (\lambda e_{kk} - 3\alpha K(T - T_0))\delta_{ij} + 2\mu e_{ij}, \quad (4)$$

$\lambda, \mu, K = \frac{2}{3}\mu + \lambda$  – упругие модули,  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения.

При высоких температурах упругие модули зависят от температуры, что подтверждается экспериментально [7,8]. Для нашего случая примем их линейную зависимость

$$E(t) = E_p - (E_p - E_0)\theta(t),$$

$$v(t) = 0.5 - (0.5 - v_0)\theta(t), \quad (5)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+v)}, \quad \lambda = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}$$

$$\theta = (T_p - T)(T_p - T)^{-1}$$

В (5)  $E_0$  – модуль Юнга при комнатной температуре  $T_0$ ,  $E_p$  – при температуре плавления  $T_p$ ,  $v_0$  – коэффициент Пуассона при комнатной температуре.

Необратимые деформации начинают расти, когда напряженное состояние достигнет поверхности нагружения  $f(\sigma_{ij}, \sigma)$  в пространстве напряжений, где  $\sigma$  – функция деформационного упрочнения. Запишем ассоциированный закон пластического течения

$$\varepsilon_{ij}^p = dp_{ij} = d\phi \frac{\partial f(\sigma_{ij}, \sigma)}{\partial \sigma_{ij}}; \quad d\phi > 0. \quad (6).$$

В качестве поверхности нагружения примем условие пластического течения Мизесса, в левой части которой запишем функция деформационного упрочнения Джонсона-Кука [9]

$$\sqrt{\frac{3}{8} \tau_{ij} \tau_{ij}} = \left( A + B(\varepsilon^p)^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p} \right) \theta, \quad (7)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  – параметры материалы, которые находится путем подбора из экспериментальных кривых,  $\varepsilon^p$  – интенсивность пластической деформации,  $\dot{\varepsilon}^p$  – интенсивность скорости

пластической деформации,  $\dot{\varepsilon}_0^p$  – интенсивность начальной скорости деформации,  $\dot{\varepsilon}_0^p = 0,0006$  1/с.

Дополняет систему уравнений (3,4,6,7) уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (8).$$

При решении поставленной задачи нам следует определить неизвестные параметры материала для уравнения (7). Подобные исследования для новых металлических сплавов распространены в мире. Так, например, в работе [10] изучаются свойства TRIPLEX стали и исследуются влияние вязкости при увеличении скорости деформирования, для других видов стали описаны исследования [11,12], для сварочных соединений металлов [13,14].

Для нахождения требуемых параметров произведем серию испытаний на растяжения с разными скоростями деформирования. Из основного металла подготовим образцы рис 2, чтобы найти коэффициентов термического упрочнения и вязкости материала

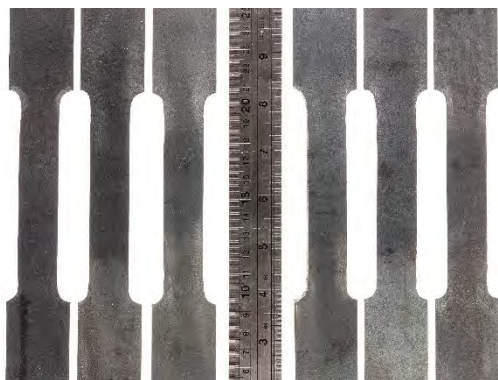


Рис. 2.

Часть образцов подвергнем термообработке в печи с выдержкой 0.5 часа при температуре 950 °С и последующей закалкой в воде, это позволит гарантированно смоделировать процесс термического упрочнения. В ходе определения физико-механических свойств материала испытания проводили согласно ГОСТ 6996 – 66, а образцы для определения физико-механических свойств изготавливали с учетом требований ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Напряжение, предел текучести и относительное удлинение при растяжении образцов определяли на универсальной испытательной машине AG-X plus SHIMADZU при скоростях перемещения захватов 0.08, 0.8 и 8.0 мм/сек, для нахождения коэффициента вязкости представленной стали. Результаты эксперимента приведены на диаграмме рис. 3. Кривые, расположенные сверху относятся к закаленному материалу, а нижние кривые к

основному материалу, не подвергшемуся термическому упрочнению. Из рис 3. видно, что материал подвергшийся закалке практически не проявляет вязкие свойства в отличие от основного материала, поскольку кривые  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  расположены близко друг к другу. Это происходит вследствие упрочнения и образование закалочных структур в материале стали.

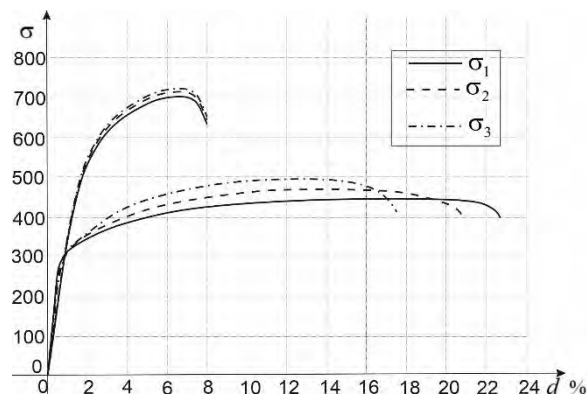


Рис. 3. Диаграмма растяжения, полученная при скорости перемещение траверсы  $\sigma_1 - 0.008$ ,  $\sigma_2 - 0.8$ ,  $\sigma_3 - 8$  мм/сек соответственно.

Поскольку деформирование материала после термического упрочнения практически не зависит от скорости, то материал сварного шва подвергли разрыву при одной скорости 0.08 мм/сек. Вследствие того, что основной металл по прочности ниже, чем металл сварного шва (ввиду его упрочнения) образцы подготовили таким образом, чтобы разрушение приходилось на зону шва, для получения физико-механических свойств непосредственно изучаемого материала.

Экспериментальная отработка режимов комбинированного теплового воздействия осуществлялась свариванием пластин с разделкой кромки по типу С21 ГОСТ 8713-79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» толщиной 12 мм, шириной 160 мм и длиной 600 мм, без предварительной очистки поверхности и подогрева зоны соединения.

В качестве материала свариваемых элементов выбрана сталь конструкционная низкоуглеродистая качественная, соответствующая ГОСТ 1050-2013 (Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей).

Процесс сварки производился при помощи сварочного агрегата АДФ-1000-5Е для автоматической подачи электродной (сварочной) проволоки в зону локального нагрева под слоем флюса. Экспериментальный электрод выполнен в виде порошковой проволоки. В качестве сердечника проволоки использован алюмотермитный наполнитель, состоящий из смеси оксида железа, восстановителя, легирующих и раскисляющих компонентов [15]

На рис. 4 приведена диаграмма деформирования на разрыв сварного шва полученного порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем и

традиционно применяемой проволокой сплошного сечения.

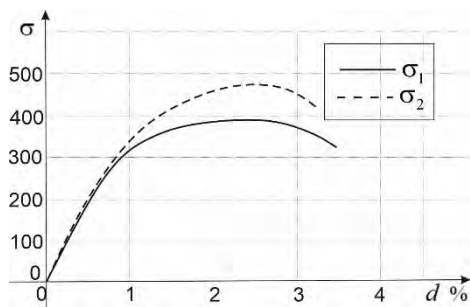


Рис. 4. Диаграмма растяжения,  $\sigma_1$  соединение, полученное проволокой сплошного сечения,  $\sigma_2$  – порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем.

Из проведенного эксперимента можно записать функцию деформационного упрочнения для основного материала

$$\sigma = \left( k_0 + 100(\varepsilon^p)^{0.16} \right) \left( 1 + 0.02 \ln \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p} \right) \theta, \quad (9)$$

и для области шва, полученного традиционной сваркой

$$\sigma = \left( k_0 + 70(\varepsilon^p)^{0.3} \right) \theta. \quad (10)$$

и экспериментальной сваркой

$$\sigma = \left( k_0 + 100(\varepsilon^p)^{0.3} \right) \theta. \quad (11)$$

В (9)  $k_0$  предел текучести при комнатной температуре основного металла, а (10) и (11)  $k_0$  – для сварного материала.

Физико-механические характеристики материала: плотность  $\rho = 781 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость  $c = 500 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ , коэффициент теплопроводности  $a = 67.8 \text{ Вт/(мК)}$ , к.п.д. источника 90, сила тока 300 А, напряжения источника тока, коэффициент теплообмена  $7.6 \text{ Вт/(мК)}$ , приведенная степень черноты 0.6, скорость источника 0.0055 м/с, модуль Юнга при комнатной температуре  $T_0 = 20^\circ \text{C}$   $E_0 = 210 \text{ ГПа}$ ,  $E_p = 0.3E_0$  при температуре плавления  $T_p = 1400^\circ \text{C}$ , коэффициент Пуассона 0.27, предел текучести для классической проволоки  $310 \text{ МПа}$ , для алюмотермитной –  $355 \text{ МПа}$ , для основного материала  $300 \text{ МПа}$ , коэффициент линейного расширения  $11.1 \cdot 10^{-6}$ . Толщина пластины 0.01 м, размеры 0.3 м на 0.25 м.

Решаем поставленную задачу численно с использованием разностного метода и итерационного метода Ньютона. В качестве граничных условий принимаем условия свободных поверхностей. Для наглядности распределения напряжений приведем в эпюрах рис. 5, рис 6, в сечениях на рис. 1, слева изображены напряжения, полученные с помощью расчетов для традиционной сварки (электродуговая сварка под флюсом

проволокой сплошного сечения), а справа электродуговая сварка под флюсом порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем.

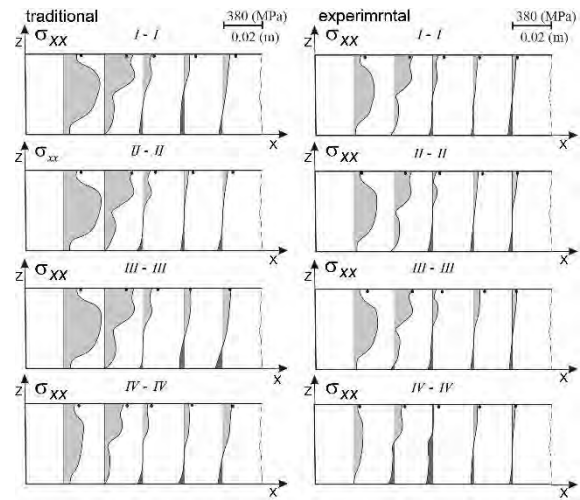


Рис. 5 Эпюры остаточных напряжений.

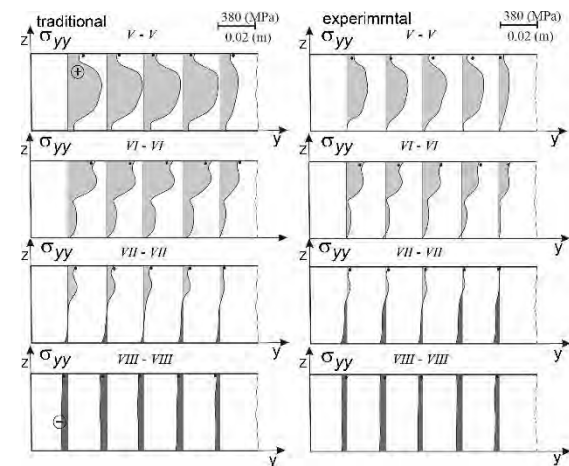


Рис. 6. Эпюры остаточных напряжений

## 2. Результаты

Для проверки теоретического расчета экспериментально определены значения остаточных напряжений в зоне неразъемного соединения полученных деталей из стали. Рентгенодифрактометрический метод определения остаточных напряжений основан на определении межплоскостного расстояния между кристаллическими решетками с помощью измерения угла отражения луча. При помощи агрегата RIGAKU MSF-3M определены остаточные напряжения в образцах сборки из стали, полученных экспериментальным способом сварки и традиционным с проволокой сплошного сечения. Значения напряжений снимались с поверхности пластины в двух направлениях вдоль и поперек шва. Они изображены на эпюрах точками. И как видно, из рис. 5 и рис. 6 расхождение теоретическим расчетом и экспериментальных небольшое, что подтверждает правильность теоретических расчетов и построенной математической модели.

По проведенным расчетам можно судить, что в области сварного шва сконцентрированы большие растягивающие напряжения, превосходящие предел

текучести, их значения убывают в направлении от шва к периферии. Самые большие значения фиксируются в центре материала пластины (в ее толщине) в области шва, при этом они уменьшаются к поверхности рис. 5 элюоры -I и рис. 6.

Сравнивая результаты остаточные напряжений в пластине, образованных в результате сварки традиционной и порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем, можно сделать вывод, что значения напряжений будут меньше при использовании комбинированного метода сварки. Это связано с тем, что материал шва остывает дольше, в результате образуются закалочные структуры, которые повышают предел текучести, увеличивают его прочность, тем самым снижая уровень остаточных напряжений.

### Заключение

В результате проделанной работы можно сделать выводы:

- Построенная математическая модель сварочного процесса подтверждается экспериментально.

### Литература

1. A.B. Arabey, V.A. Khotinov, A.O. Struin, V.M. Farber, Weld seams in large-diameter pipe of K60 strength class, *Steel Transl*, 41(1), pp. 1-5 (2011)
2. O.N. Komarov, S.G. Zhilin, D.A. Potianikhin, V.V. Predein, E.E. Abashkin, A.A. Sosnin, and A.V. Popov, The influence of structure on the strength properties of casting steel obtained with the use of thermite materials, in *Mechanics*, AIP Conf Proc 1785, pp. 040027-1–040027-5 (2016)
3. D. Sergejevs, S. Mikhaylovs, Analysis of factors affecting fractures of rails welded by alumino-thermic welding, *Transp. Prob*, 3(4-2), pp. 33-37 (2008). (in Russian).
4. V.A. Kargin, L.B. Tikhomirova, M.S. Galay and Y.S. Kuznetsova Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding, *Weld. Int.*, 29(2) pp. 155-157 (2015)
5. A. Skyttebol, B.L. Josefson, J.W. Ringsberg Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses, *Engineering Fracture Mechanics* 72 (2005) 271–285
6. B. Lennart Josefson, R. Bisschop, M. Messaadi, J. Hantusch Residual stresses in thermite welded rails: significance of additional forging. *Welding in the World* (2020) 64:1195–1212
7. X. Wang, J. Wana, J. Wang, L. Zhu, H. Ruan Anomalous sudden drop of temperature-dependent Young's modulus of a plastically deformed duplex stainless steel *Materials and Design* 181 (2019) 108071
8. H. Xue, D. Liu, R. Ge, Libo Pan, W. Peng The delay loop phenomenon in high temperature elasticity modulus test by in-situ ultrasonic measurements *Measurement* V. 160, August 2020, 107833
9. Sung, J.H.; Kim, J.H.; Wagoner, R.H. A plastic constitutive equation incorporating strain, strain-rate, and temperature. *Int. J. Plast.* 2010, 26, 1746–1771.
10. Wei Wang, Yan Ma, Muxin Yang, Ping Jiang, Fuping Yuan and Xiaolei Wu Strain Rate Effect on Tensile Behavior for a High Specific Strength Steel: From Quasi-Static to Intermediate Strain Rates, *Metals* 2018, 8, 11; doi:10.3390/met8010011
11. Fischer, F.D.; Reisner, G.; Werner, E.; Tanaka, K.; Cailletaud, G.; Antretter, T. A new view on transformation induced plasticity (TRIP). *Int. J. Plast.* 2000, 16, 723–748.
12. Grässel, O.; Krüger, L.; Frommeyer, G.; Meyer, L.W. High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application. *Int. J. Plast.* 2000, 16, 1391–1409.
13. Dong, D.Y.; Liu, Y.; Yang, Y.L.; Li, J.F.; Ma, M.; Jiang, T. Microstructure and dynamic tensile behavior of DP600 dual phase steel joint by laser welding. *Mater. Sci. Eng. A* 2014, 594, 17–25.
14. Liu, Y.; Dong, D.Y.; Wang, L.; Chu, X.; Wang, P.F.; Jin, M.M. Strain rate dependent deformation and failure behavior of laser welded DP780 steel joint under dynamic tensile loading. *Mater. Sci. Eng. A* 2015, 627, 296–305.
15. E.E. Abashkin, O.N. Komarov, S.G. Zhilin, V.V. Predein, A.V. Tkacheva, G.L. Panchenko, Russian Patent No. 2675876 (29 December 2017)

### References

1. A.B. Arabey, V.A. Khotinov, A.O. Struin, V.M. Farber, Weld seams in large-diameter pipe of K60 strength class, *Steel Transl*, 41(1), pp. 1-5 (2011)
2. O.N. Komarov, S.G. Zhilin, D.A. Potianikhin, V.V. Predein, E.E. Abashkin, A.A. Sosnin, and A.V. Popov, The influence of structure on the strength properties of casting steel obtained with the use of thermite materials, in *Mechanics*, AIP Conf Proc 1785, pp. 040027-1–040027-5 (2016)
3. D. Sergejevs, S. Mikhaylovs, Analysis of factors affecting fractures of rails welded by alumino-thermic welding, *Transp. Prob*, 3(4-2), pp. 33-37 (2008). (in Russian).

4. V.A. Kargin, L.B. Tikhomirova, M.S. Galay and Y.S. Kuznetsova Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding, *Weld. Int.*, 29(2) pp. 155-157 (2015)
5. Skyttebol, B.L. Josefson, J.W. Ringsberg Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses. *Engineering Fracture Mechanics* 72 (2005) 271–285
6. Lennart Josefson, R. Bisschop, M. Messaadi, J. Hantusch Residual stresses in thermite welded rails: significance of additional forging. *Welding in the World* (2020) 64:1195–1212
7. X. Wang, J. Wana, J. Wang, L. Zhu, H. Ruan Anomalous sudden drop of temperature-dependent Young's modulus of a plastically deformed duplex stainless steel *Materials and Design* 181 (2019) 108071
8. H. Xue, D. Liu, R. Ge, Libo Pan, W. Peng The delay loop phenomenon in high temperature elasticity modulus test by in-situ ultrasonic measurements *Measurement* V. 160, August 2020, 107833
9. Sung, J.H.; Kim, J.H.; Wagoner, R.H. A plastic constitutive equation incorporating strain, strain-rate, and temperature. *Int. J. Plast.* 2010, 26, 1746–1771.
10. Wei Wang, Yan Ma, Muxin Yang, Ping Jiang, Fuping Yuan and Xiaolei Wu Strain Rate Effect on Tensile Behavior for a High Specific Strength Steel: From Quasi-Static to Intermediate Strain Rates, *Metals* 2018, 8, 11; doi:10.3390/met8010011
11. Fischer, F.D.; Reisner, G.; Werner, E.; Tanaka, K.; Cailletaud, G.; Antretter, T. A new view on transformation induced plasticity (TRIP). *Int. J. Plast.* 2000, 16, 723–748.
12. Grässel, O.; Krüger, L.; Frommeyer, G.; Meyer, L.W. High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application. *Int. J. Plast.* 2000, 16, 1391–1409.
13. Dong, D.Y.; Liu, Y.; Yang, Y.L.; Li, J.F.; Ma, M.; Jiang, T. Microstructure and dynamic tensile behavior of DP600 dual phase steel joint by laser welding. *Mater. Sci. Eng. A* 2014, 594, 17–25.
14. Liu, Y.; Dong, D.Y.; Wang, L.; Chu, X.; Wang, P.F.; Jin, M.M. Strain rate dependent deformation and failure behavior of laser welded DP780 steel joint under dynamic tensile loading. *Mater. Sci. Eng. A* 2015, 627, 296–305.
15. E.E. Abashkin, O.N. Komarov, S.G. Zhilin, V.V. Predein, A.V. Tkacheva, G.L. Panchenko, Russian Patent No. 2675876 (29 December 2017)

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

**Евгений Евгеньевич Абашкин**, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005, Комсомольск – на – Амуре, ул. Металлургов, 1, e-mail: abashkine@mail.ru

**Evgeny E. Abashkin**, Ph.D. (Eng), Researcher, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 681005, Komsomolsk - on - Amur, st. Metallurgov, 1, e-mail: abashkine@mail.ru

**Анастасия Валерьевна Ткачева**, кандидат физ. – мат. наук, старший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005, Комсомольск – на – Амуре, ул. Металлургов, 1, e-mail: 4nansi4@mail.ru

**Anastasia Valerievna Tkacheva**, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, 681005, Komsomolsk - on - Amur, st. Metallurgov, 1, e-mail: 4nansi4@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.09.2021; одобрена после рецензирования 03.11.2021, принята к публикации 16.01.2022.

The article was submitted 07.09.2021; approved after reviewing 03.11.2021; accepted for publication 16.01.2022.

**Научная статья**

УДК 62-51: 658.513: 658.5.018.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.005>

## Оперативное управление судоремонтным производством с использованием цифровых двойников

О.В. Колесникова<sup>1</sup> miis@mail.ru Л.Б. Леонтьев<sup>1</sup> leontyev.l.b@yandex.ru, В.Е. Лелюхин<sup>2</sup> lelvo@mail.ru

<sup>1</sup>Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, <sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет

**Аннотация.** В статье излагается способ повышения надежности автоматизированной системы управления судоремонтным производством при оперативном возникновении отклонений в ходе выполнения производственного процесса, вызванных различными внешними и внутренними факторами с использованием цифровых двойников. Объектом исследования является автоматизированная система управления цифровыми двойниками на предприятии с мелкосерийным и единичным позаказным производством. Для повышения надежности работы системы в условиях критической загрузки отдельных цехов и участков предлагается автоматизировать оперативное управление. Модернизация системы заключается во введении обратной связи с автоматической корректировкой информационного состояния ядра управления. Ядром управления является информационная база, существующая в квазиметрическом двумерном пространстве с координатами множества нормированных рабочих мест предприятия и реально текущим временем. Таким образом, появляется возможность непосредственного воздействия на постоянно изменяющееся состояние ядра. Для этого организовывается контролируемый доступ к изменению цифрового двойника в соответствии с реальным состоянием производственного процесса. При размещении нового заказа или при возникновении отклонений в ходе производственного процесса выполняется корректировка состояния ядра управления, которая заключается в поиске и размещении невыполненной технологической операций в графике загрузки рабочих мест. Для реализации управления производством на основе цифровых двойников предлагается реорганизация функций и взаимоотношений исполнителей, а также создание соответствующей инфраструктуры.

**Ключевые слова:** судоремонт, позаказное производство, оперативное управление, производственный процесс, ядро управления, цифровые двойники, цифровая модель, технологические процессы, производственное расписание.

**Для цитирования:** Колесникова О.В., Леонтьев Л.Б., Лелюхин В.Е. Оперативное управление судоремонтным производством с использованием цифровых двойников, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 37—43

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.005>

## Operational management of ship repair production using digital twins

Olga V. Kolesnikova<sup>1</sup> miis@mail.ru Lev B. Leontiev<sup>1</sup> leontyev.l.b@yandex.ru,

Vladimir E. Lelyukhin<sup>2</sup> lelvo@mail.ru

<sup>1</sup>Marine State University G.I. Nevelskoy, <sup>2</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** Article describes a method for increasing reliability of an automated control system ship repair production in event of prompt occurrence of deviations during production process caused by various external and internal factors using digital twins. Object of the research is an automated control system for digital twins at an enterprise small-scale and single-order production. To improve reliability of system under critical load conditions of individual shops and sections, it proposed to automate operational management. Modernization of system consists in providing feedback with automatic correction of information state of control core. The core of management is an information base that exists in a quasi-metric two-dimensional space with coordinates of set workplaces of enterprise and actual current time. Thus, it becomes possible to directly influence constantly changing state of nucleus. For this, controlled access to change digital twin is organized in accordance with real state of production process. When a new order is placed or deviations occur during the production process, state of control core is adjusted. It consists in finding and placing unfulfilled technological operations in workload schedule. To implement production management based on digital twins, it is proposed to reorganize functions and relationships of performers, as well as to create an appropriate infrastructure.

**Key words:** ship repair, custom production, operational management, production process, control core, digital twins, digital model, technological processes, production schedule.

**For citation:** Olga V. Kolesnikova, Lev B. Leontiev, Vladimir E. Lelyukhin, Operational management of ship repair production using digital twins, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 37—43

### Введение

Особенностью многих судостроительных и судоремонтных предприятий с позаказным производством является мелкосерийный и

единичный характер. При этом производственным процессам изготовления продукции свойственна дискретность выполнения технологических операций. Именно этот тип производства довольно сложен для управления и планирования. Поэтому

поиск эффективных методов планирования, организации производства, а также автоматизации управления является актуальной задачей.

Качество управления производственным процессом для мелкосерийного производства во многом определяется полнотой и корректностью исходной конструкторской и технологической информации. Постоянная смена номенклатуры изготавливаемых изделий, особенно характерная для ремонтных предприятий, приводит к необходимости перестройки технологических процессов и решению достаточно сложных задач управления с ограниченными временными рамками.

Создание системы управления производством, интеграция в единую систему задач сбора, обработки данных и оперативного управления повышает качество и эффективность функционирования всех звеньев реального производства. Поиск и разработка эффективных методов управления представлены в работах отечественных и зарубежных ученых и исследователей [1, 2, 3, 4].

Рассматриваемые задачи относятся к классу NP сложных и при сегодняшнем уровне развития информационных технологий не могут быть решены за приемлемое время [5, 6].

Многие из этих задач изучались математиками и специалистами по вычислениям в течение десятилетий, и для них не удалось построить какие-то математические доказательства, поэтому на практике при построении алгоритмов зачастую используются эвристики [2, 5, 7, 8].

В статье излагается способ повышения надежности автоматизированной системы управления производством при оперативном возникновении отклонений в ходе выполнения производственного процесса, вызванных различными внешними и внутренними факторами с использованием цифровых двойников [8, 9].

## 1. Объект исследования

Рассматриваемый объект исследования представляет собой автоматизированную систему управления цифровыми двойниками (Digital Twin) детали-сборочных единиц (ДСЕ) в масштабах всего производства. Под цифровым двойником ДСЕ понимается цифровой (виртуальный) производственно-технологический образ ДСЕ, т.е. цифровая модель совокупности межоперационных её состояний [5, 10, 11].

При формировании программы управления производством  $P_u$ , для каждого заказа  $z_i$  из множества заказов  $Z$  ( $Z := \{z_1, z_2, \dots, z_n\}, z_i \in Z$ ) необходимо решить задачу распределения конечного множества разнохарактерных технологических потоков  $F^T$  ( $F^T := \{f_1^T, f_2^T, \dots, f_l^T\}$ ,  $f_k^T \in F^T$ ) в конечном дискретном пространстве рабочих мест  $R$  ( $R := \{r_1, r_2, \dots, r_m\}, r_j \in R$ ) [12]. Тогда управление производством осуществляется в соответствии с программой, которая формируется в виде графика выполнения детали-операций, распределенных по рабочим местам в соответствии с производственными структурами заказов.

Исходной информацией для формирования программы управления производственными потоками является следующий набор [12, 13]:

1) множество заказов  $Z$ , в состав каждого из которых входит конечное множество изделий,

представляемых в виде графа-дерева детали-сборочных единиц (ДСЕ);

2) множество технологических процессов, с описанием параметров выполнения всех детали-операций  $O$  ( $O := \{o_1, o_2, \dots, o_g\}, o_q \in O$ ) для каждой ДСЕ;

3) множество отношений порядка следования детали-операций  $E$  ( $E := \{e_1, e_2, \dots, e_d\}, e_h \in E$ ) в производственно-технологической структуре каждого изделия;

4) множество рабочих мест на предприятии  $R$ .

В общем виде такую модель можно представить системой с программным управлением, где для каждой ДСЕ формируются технологические потоки  $f_k^T$ , зависящие от набора технологических операций  $o_q$ , и отношений порядка следования детали-операций  $e_h$ , соответствующих рабочим местам  $r_j$ , размещаемый на временной координате  $t$ . При этом в ядре управления размещается все множество технологических потоков  $F^T$ , распределяемое по свободным временным промежуткам в пространстве рабочих мест  $R$ . Планово-производственная документация (ППД) формируется на основе исходной информации  $F^T(O, E, R, t)$ , которая поступает в производственные подразделения в качестве программы действий персонала. Оперативное управление производственным персоналом осуществляется диспетчерами ПДО, начальниками и мастерами цехов и участков в соответствии с сформированной программой плана производства [12].

В АО «Дальрыбтехцентр», выпускающем широкую номенклатуру оборудования для рыбоперерабатывающих судов, уже несколько лет эксплуатируется система автоматизированного управления производством построенная на основе описанной модели.

Мониторинг системы, оценка надежности работы и качества управления показали высокую эффективность её эксплуатации при отсутствии отклонений от заданной программы – производственного плана графика. Однако в периоды возрастания производственной загрузки фиксировалось лавинообразное нарастание отклонений в производственном графике. Анализ показал, что характер нарастания отклонений определяется критической величиной отклонений, возникающих в единицу времени и совсем не зависит от причин, вызывающих эти отклонения [12].

## 2. Модель оперативного управления отклонениями

В функционирующей на предприятии системе управления информационное ядро изменяется только в моменты формирования нового заказа, тем самым, не отражая действительной ситуации в цехах и участках при возникновении любых отклонений. Это приводит к необходимости оперативного регулирования с помощью диспетчеров, мастеров и начальников производственных подразделений.

Для повышения надежности работы системы в условиях критической загрузки отдельных цехов и участков предложено автоматизировать оперативное управление, используя в качестве объекта регулирования цифрового двойника ядра

управления, к которому организовывается контролируемый доступ [12].

Сущность модернизации системы заключается во ведении обратной связи с автоматической корректировкой информационного состояния ядра управления. Ядром управления является информационная база, существующая в квазиметрическом двумерном пространстве с координатами множества нормированных рабочих мест предприятия ( $R$ ) и реально текущим временем ( $t$ ). Таким образом, появляется возможность непосредственного воздействия на постоянно изменяющееся состояние ядра.

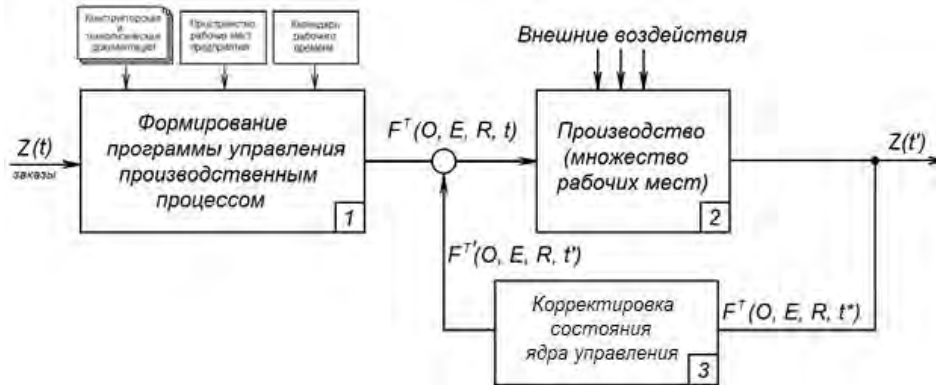


Рис. 1. Модель комплексного управления производством

Для формирования цифрового двойника необходимо чтобы в ядре управления в любой момент времени отображалось реальное состояние производственного процесса. Для этого предлагается автоматическая регистрация возникающих отклонений на момент ожидаемого регламентированного окончания  $i$ -ой операции. Моментом регистрации отклонения является несвоевременное поступление информации о её окончании.

При возникновении отклонений в производственном процессе от заданной программы, информация поступает всем аффилированным пользователям и осуществляется поиск решения для стабилизации производства.

Для построения автоматизированной системы оперативного управления рассматривается набор следующих обобщенных функций:

- формирование стека времени окончания выполнения технологических операций на текущую смену всех подразделений производства;
- сравнение состояния ядра управления с информацией, поступающей с рабочих мест на каждом шаге квантования;
- формирование управляющего решения (изменение схемы расстановки невыполненных деталей-операций в ядре управления);
- корректировка состояния ядра управления.

В общем виде, корректировка состояния ядра управления заключается в поиске и размещении невыполненной технологической операций в графике загрузки рабочих мест. Осложнение обуславливается тем, что перестановка рассматриваемой операции влечет за собой необходимость перестановки всех последующих операций до конечной в цепи изготовления изделия или выполнения заказа. Такую цепь назовем дефектной.

Структурная схема предлагаемой модели управления производством показана на рис. 1. Здесь управление осуществляется смещением технологических потоков  $F^T(O, E, R, t)$  на величину  $\Delta t$  при соблюдении условий их непротиворечивого размещения. В результате корректировки исходные потоки заменяются новыми  $F^{T'}(O, E, R, t')$  [12].

В случаях возникновения алгоритмически неразрешимых неопределенностей предусмотрено регламентированное интерактивное взаимодействие производственного персонала с цифровым двойником ядра управления.

Тогда корректировка состояния ядра управления заключается в размещении операций дефектной цепи,  $O_d := \{o_1, o_2, \dots, o_k\}, o_j \in O$  содержащей  $k$  операций на  $m$  незанятых рабочих местах  $R := \{r_1, r_2, \dots, r_m\}, r_j \in R$ .

Известно, что количество размещений из  $k$  элементов по  $m$ , обозначаемое  $A_k^m$ , равно убывающему факториалу [6, 7]

$$A_k^m = k^m = (k)_m = \frac{k!}{(k-m)!} = \binom{k}{m} m!$$

Таким образом, степень сложности комбинаторной задачи при корректировке ядра управления зависит от количества элементов (технологических операций) дефектной цепи.

### 2.1. Формирование дефектной цепи

Дефектная цепь формируется перечислением вершин в пути от невыполненной операции до последней в текущем заказе. На рис. 2 показан фрагмент, демонстрирующий наличие разных ДСЕ в составе и структуре дефектной цепи.

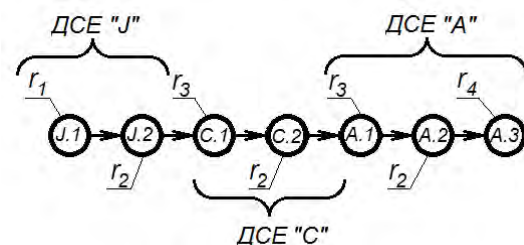


Рис. 2. Состав и структура дефектной цепи

Формирование дефектной цепи рассматривается как типовая задача и сводится к задаче поиска наименьшего общего предка на графе дерева. Наименьший общий предок (нижайший общий



предок) вершин  $u$  и  $v$  в корневом дереве  $T$  — наиболее удалённая от корня дерева вершина, лежащая на обоих путях от  $u$  и  $v$  до корня, т. е. являющаяся предком обеих вершин. Общепринятое в мире обозначение этой задачи — LCA (*least common ancestor*).

Существует множество алгоритмов формального поиска цепи от любой исходной вершины до корня графа дерева [14, 15].

Наиболее простой алгоритм для нахождения наименьшего общего предка — определить глубину вершин  $u$  и  $v$  и постепенно подниматься из каждой вершины вверх по дереву, пока не будет найдена общая вершина. Алгоритм двоичного подъема, требующий  $O(n \cdot \log n)$  времени на препроцессинг и  $O(\log n)$  времени на запрос (вычисление наименьшего общего предка двух вершин), где  $n$  — число вершин графа. Идея заключается в том, чтобы вычислить для каждой вершины предка, удалённого от неё на расстояние  $2^k$  для всех  $k$ , и использовать эту информацию для ускорения.

## 2.2. Размещение дефектной цепи в ядре управления

Как показано на рис. 2 в состав дефектной цепи входит определенный последовательный набор технологических процессов изготовления ДСЕ. Поэтому размещение дефектной цепи может рассматриваться как постановка задачи линейного целочисленного программирования [11, 13].

Имеется множество изготавливаемых деталей-сборочных единиц  $S := \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ ,  $o_j \in O$  и множество соответствующих им технологических процессов  $P := \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ ,  $p_j \in P$ , тогда

$$\forall S_i \exists P_i : S_i \Leftrightarrow P_i$$

Каждый техпроцесс состоит из последовательности технологических операций  $O_{S_i} := \{o_1^{S_i}, o_2^{S_i}, \dots, o_k^{S_i}\}$ , которые должны быть выполнены

$$\forall p_{S_i} \exists O_{S_i} : O_{S_i} \Leftrightarrow P_i$$

Для их выполнения имеется множество ресурсов (рабочих мест)  $R := \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ . Каждая операция может быть выполнена на некотором подмножестве множества рабочих центров

$$R(o_j^{S_i}) := \{r_k, r_{k+1}, \dots, r_{k+l}\}$$

Способность ресурса выполнять операции характеризуется интервалом его доступности, т.е. графиком работы. Интервал доступности задается дискретным множеством минут.

Таким образом, доступность рабочих мест задается множеством  $D := \{d_{r_1}, d_{r_2}, \dots, d_{r_m}\}$ , где  $D_{r_i} := \{d_1^{r_i}, d_2^{r_i}, \dots, d_p^{r_i}\}$ ,  $d_j^{r_i}$  — состояние на  $j$ -ой минуте. Элемент множества принимает значения:

$$d_j^{r_i} = \begin{cases} 1 - \text{занят} \\ 0 - \text{свободен} \end{cases}$$

Длительность операции определяется временем её выполнения ( $t$ ). При выполнении операции на рабочем месте минуты следуют одна за другой без перерыва.

На множестве технологических операций  $O$  задан порядок, соответствующий электронной структуре изделия. Расписанием изготовления одного изделия называется вектор  $P_V := \{p_{v_1}, p_{v_2}, \dots, p_{v_n}\}$ , где  $p_{v_j}$  — время начала изготовления детали-сборочной единицы  $v_j \in V$ .

С учетом того, что изготовление детали-сборочной единицы состоит из нескольких операций, тот же вектор расписания запишется в виде

$$P_v := \{p_{v_1}^{o_1}, p_{v_1}^{o_2}, \dots, p_{v_1}^{o_k}, p_{v_2}^{o_1}, \dots, p_{v_n}^{o_m}\},$$

где  $p_{v_j}^{o_i}$  — время начала выполнения  $i$ -ой операции детали-сборочной единицы  $v_j$ .

Момент времени, в который заканчивается выполнение операции, обозначим

$$f_{v_j}^{o_i} = p_{v_j}^{o_i} + \sum_{j=1}^z d_j^{r_k},$$

где  $z$  — длительность выполнения операции  $o_j$  равная количеству минут  $d_j^{r_k}$ .

Моментом окончания изготовления детали-сборочной единицы  $v_j$  в расписании будет момент окончания последней технологической операции

$$f_{p_{v_i}} = \max_{i=1, \dots, l} f_{v_j}^{o_i}$$

Тогда моментом окончания производства изделия или длиной расписания является величина

$$f_p = \max_{i=1, \dots, n} f_{p_{v_i}}$$

Расписание будет считаться допустимым, если в любой момент времени выполняется условие, при котором требования операций к использованию рабочих мест не превышают периода их доступности (суммарное время выполнения всех операций не превышает времени работы всех рабочих мест в соответствии с графиком)

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l (f_{v_j}^{o_i} - p_{v_j}^{o_i}) \leq \sum_{i=1}^m t_{r_i},$$

а также соблюдаются ограничения порядка выполнения операций и обработки детали-сборочных единиц:

- для любых двух смежных вершин графа структуры изделия момент времени окончания обработки вершины (ДСЕ), являющейся началом дуги, должен быть меньше момента начала обработки вершины (ДСЕ), являющейся концом дуги

$$\forall i, j : V_i \in N, V_j \in K, \Rightarrow f_{p_{v_i}} < p_{v_j}$$

- для любых двух последовательных операций момент времени окончания операции, являющейся началом дуги, должен быть меньше момента времени начала операции, являющейся концом дуги

$$j, k : o_j, o_k \in O_{v_i}, o_j \in N, o_k \in K, \Rightarrow p_{v_i}^{o_j} + \sum_{i=1}^z d_i^{r_i} < p_{v_i}^{o_k}$$

В этом случае графиком загрузки рабочего места  $r_i$  является выборка периодов занятости данного рабочего места из общего расписания изготовления изделия [6, 12].

## 3. Организация взаимодействия с цифровым двойником

Использование цифровых двойников для управления производственным процессом предприятия предполагает кардинальное изменение подходов в организации работы предприятия.

В результате изменения состояния ядра управления изменяются не только сроки выполнения некоторых технологических операций и изготовления ДСЕ, но в ряде случаев также возможно изменение даты исполнения заказа.

На практике во избежание изменения сроков выполнения заказов зачастую руководителями принимаются решения об организации работы на критических участках и рабочих местах в нерабочее время. В таких случаях для обеспечения адекватного отображения состояния ядра управления предлагается реорганизация функций и взаимоотношений исполнителей в соответствии с

рис. 3, а также создание соответствующей инфраструктуры.

Если традиционно диспетчерская служба предполагает управление непосредственно руководством участков и цехов, которые в свою очередь управляют рабочими, то в рассматриваемой схеме (Рис. 3) все информационные потоки, характеризующие текущее состояние производства, связаны с ядром управления, который, по сути, является цифровым двойником производства.

Тогда фактически диспетчерская служба управляет компьютером, который регламентирует и отслеживает выполнение всех детали-операций.

Кроме того, компьютер фиксирует отклонения в ходе выполнения производственного процесса и формирует варианты корректировки производственной программы.

Для реализации управления производством на основе цифровых двойников необходима реорганизация функций и взаимоотношений исполнителей, а также создание соответствующей инфраструктуры.



Рис. 3. Схема взаимодействия с цифровым двойником

В качестве инфраструктуры в работе рассматривается программно-технический комплекс оперативного управления производством, который включает комплект программного обеспечения с интерактивным интерфейсом, а также набор оборудования и технических средств передачи и преобразования информации.

### Заключение

В статье показано, что в многономенклатурном позаказном производстве при строительстве и ремонте судов для оперативного управления производством использование цифровых двойников в случаях возникновения разнохарактерных отклонений позволяет стабилизировать производственный процесс в кратчайшие сроки с минимальными дополнительными расходами.

Для оперативного управления рассматривается внесение корректировок в ядро управления как цифрового двойника фактического состояния производства предприятия.

Показано, что при решении комбинаторной задачи корректировки ядра управления количество вариантов размещений зависит от длины дефектной цепи и количества используемых рабочих мест.

Для реализации управления производством на основе цифровых двойников предполагается реорганизация функций и взаимоотношений исполнителей, а также создание соответствующей инфраструктуры.

### Литература

1. А.В. Фирсова, Д.С. Хмара, М.А. Шальнов. Основные направления развития автоматизированных систем управления и поддержки принятия решений в судостроении и организации рабочих мест. / Морские интеллектуальные технологии. №3 (46) Т.1 2021, с.70-76. eISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
2. Mark H. Spicknall, Ramesh Kumar. A Dimensional Engineering Process for Shipbuilding. Journal of Ship Production, Vol. 18, No. 2, May 2002, pp. 105–115. ISSN 8756-1417
3. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Интегрированная система подготовки производства судоремонтного предприятия. / Судостроение, 2015, №2, с. 52-54. ISSN 0039-4580
4. Кунц, Г. Управление: системный и ситуационный анализ управленческих функций. / Г. Кунц, С. О'Доннел - М.: Прогресс, 1981. - 494с.
5. V. E. Lelyukhin and O. V. Kolesnikova, "Strategy for the Formation of Production Plans for Small-Serial Machine-Building Enterprises," 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-6.
6. Колесникова О.В., Рупинец И.С., Лелюхин В.Е. Проблемы перепланирования при автоматизации управления многономенклатурным машиностроительным производством // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 3. – С. 45-50. ISSN 1812-7320
7. Конвей, Р.В., Максвелл, В.Л., Миллер, Л.В. Теория расписаний. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975.
8. Лелюхин В. Е., Колесникова О. В. Цифровое информационное пространство управления производством морской техники. /Морские интеллектуальные технологии. № 2 (44) Т. 2 2019 с. 45-49 .ISSN: 2073-7173 eISSN: 2588-0233
9. Фролов Е.Б., Климов А.С., Зин Мин Хтун. Цифровой двойник производственной системы на основе программного обеспечения категории MES. [Digital twin of a production system based on MES software] / Вестник Брянского государственного технического университета: 2018, № 12, с.66-73.
10. Aaron Parrott, Lane Warshaw. Industry 4.0 and the digital twin technology. Deloitte Insights (12-05-2017). — Manufacturing meets its match. URL: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3833\\_Industry4-0\\_digital-twin-technology/DUP\\_Industry-4.0\\_digital-twin-technology.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3833_Industry4-0_digital-twin-technology/DUP_Industry-4.0_digital-twin-technology.pdf) (Дата обращения: 10 апреля 2021).
11. Mark Cotteleer, "3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth," Deloitte Review 14, Deloitte University Press, January 18, 2014.).

12. Колесникова О.В., Рупинец И.С., Лелюхин В.Е. Цифровые двойники для автоматизации оперативного управления машиностроительным производством / Современные наукоёмкие технологии. – 2021. – № 6-1. – С. 39-44. ISSN 1812-7320
13. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Кузьмина Т.А. Оперативная корректировка планов мелкосерийного и единичного производства с использованием механизма диспетчирования. //Автоматизация в промышленности. М.: Издательский дом «ИнфоАвтоматизация», 2016, № 12, с. 32-35.
14. Кормен, Томас Х., Лейзерсон, Чарльз И., Ривест, Рональд Л., Штайн, Клиффорд. Алгоритмы: построение и анализ, 2-е издание. : Пер. с англ. — М. : Издательский дом “Вильямс”, 2013. — 1296 с. ISBN 978-5-8459-0857-5
15. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), 2011. — 222 с.

#### References

1. A.V. Firsova, D.S. Hmara, M.A. Shal'nov. Osnovnye napravlenija razvitija avtomatizirovannyh sistem upravlenija i podderzhki prinjatija reshenij v sudostroenii i organizacii rabochnih mest. [The main directions of development of automated control systems and decision support in shipbuilding and workplace organization]. Morskije intelektual'nye tehnologii. №3 (46) T.1 2021, s.70-76. eISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
2. Mark H. Spicknall, Ramesh Kumar. A Dimensional Engineering Process for Shipbuilding. Journal of Ship Production, Vol. 18, No. 2, May 2002, pp. 105–115. ISSN 8756-1417
3. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V. Integrirovannaja sistema podgotovki proizvodstva sudoremonnogo predprijatija.[Integrated system of preparation for production of a ship repair enterprise]. Sudostroenie, 2015, №2, s. 52-54. ISSN 0039-4580.
4. Kunc, G. Upravlenie: sistemnyj i situacionnyj analiz upravlencheskih funkcij.[Management: systemic and situational analysis of management functions]. G. Kunc, S. O'Donnel - M.: Progress, 1981. - 494s
5. V. E. Lelyukhin and O. V. Kolesnikova, "Strategy for the Formation of Production Plans for Small-Serial Machine-Building Enterprises," 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-6.
6. Kolesnikova O.V., Rupinec I.S., Lelyukhin V.E. Problemy pereplanirovaniya pri avtomatizacii upravlenija mnogonomenklaturnym mashinostroitel'nym proizvodstvom [Problems of reflecting in automation management of multi-nominal machine-building production]. Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2021. – № 3. – S. 45-50. ISSN 1812-7320.
7. Конвей, Р.В., Максвелл, В.Л., Миллер, Л.В. Теория расписаний [Scheduling theory]. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975.
8. Lelyukhin V. E., Kolesnikova O. V. Cifrovoe informacionnoe prostranstvo upravlenija proizvodstvom morskoi tehniki [Digital information space of marine manufacturing equipment]. Morskije intelektual'nye tehnologii. № 2 (44) T. 2 2019 s. 45-49 .ISSN: 2073-7173 eISSN: 2588-0233
9. Frolov E.B., Klimov A.S., Zin Min Htun. Cifrovoy dvojniki proizvodstvennoj sistemy na osnove programmnoho obespechenija kategorii MES. Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta: 2018, № 12, s.66-73.
10. Aaron Parrott, Lane Warsaw. Industry 4.0 and the digital twin technology. Deloitte Insights (12-05-2017). — Manufacturing meets its match. URL: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3833\\_Industry4-0\\_digital-twin-technology/DUP\\_Industry-4.0\\_digital-twin-technology.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3833_Industry4-0_digital-twin-technology/DUP_Industry-4.0_digital-twin-technology.pdf) (Дата обращения: 10 апреля 2021).
11. Mark Cotteleer, “3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth,” Deloitte Review 14, Deloitte University Press, January 18, 2014.)
12. Kolesnikova O.V., Rupinec I.S., Lelyukhin V.E. Cifrovye dvojniki dlja avtomatizacii operativnogo upravlenija mashinostroitel'nym proizvodstvom [Digital twins for automation of operational management of machine-building production]. Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2021. – № 6-1. – S. 39-44. ISSN 1812-7320
13. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Kuz'minova T.A. Operativnaja korektirovka planov melkoserijnogo i edinichnogo proizvodstva s ispol'zovaniem mehanizma dispetchirovaniya.[ Prompt adjustment of plans for small-scale and single-piece production using a dispatching mechanism]. Avtomatizacija v promyshlennosti. M.: Izdatel'skij dom «InfoAvtomatizacija», 2016, № 12, s. 32-35.
14. Kormen, Tomas X., Lejzerson, Charl'z I., Rivest, Ronal'd L., Shtajn, Klifford. Algoritmy: postroenie i analiz [Algorithms: construction and analysis], 2-e izdanie. : Per. s angl. — M. : Izdatel'skij dom “Vil'jams”, 2013. — 1296 s. ISBN 978-5-8459-0857-5
15. Lazarev A.A., Gafarov E.R. Teorija raspisanij. Zadachi i algoritmy [Schedule theory. Tasks and algorithms]. M.: Moskovskij gosudarstvennyj universitet im. M.V. Lomonosova (MGU), 2011. — 222 s.

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

**Ольга Валерьевна Колесникова**, кандидат технических наук, доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Приморский край, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: miis@mail.ru

**Olga V. Kolesnikova**, Ph.D. (Eng)s, assistant professor MSU named after admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovaya, 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation, e-mail: miis@mail.ru

**Лев Борисович Леонтьев**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Приморский край, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

**Lev B. Leontiev**, Dr. Sci. (Eng), professor, professor MSU named after admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovaya, 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

**Владимир Егорович Лелюхин**, кандидат технических наук, доцент, профессор департамента компьютерно-интегрированных систем, Дальневосточный федеральный университет, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8., e-mail: lelv0@mail.ru

**Vladimir E. Lelyukhin**, Ph.D. (Eng)s, assistant professor, Professor of the Department of Computer Integrated Systems, Far Eastern Federal University, Sukhanova, 8, Vladivostok 690091, Russian Federation, e-mail: lelv0@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.01.2022; одобрена после рецензирования 22.02.2022, принята к публикации 28.02.2022.

The article was submitted 15.01.2022; approved after reviewing 22.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.

Научная статья

УДК 629.5:620.197.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.006>

## Совершенствование методик проектирования судов в аспекте регламента технических требований к электрохимической защите

В.Р. Душко<sup>1</sup> v.r.dushko@mail.ru, О.А. Иванова<sup>1,2</sup> o.a.ivanova.kmt@mail.ru,

В.А. Крамарь<sup>1</sup> kramarv@mail.ru, А.В. Родькина<sup>1</sup> a.v.rodkina@mail.ru

<sup>1</sup>Севастопольский государственный университет, <sup>2</sup>ЦКБ «Коралл»

**Аннотация.** С целью обоснования предпосылок к пересмотру технических требований по защитному потенциалу регламента систем катодной защиты для различных категорий судостроительных сталей выявлен вид электрохимической защиты, который имеет меньшую массу в нагрузке масс судна, выполнено технико-экономическое обоснование применения данного вида защиты, определено минимальное значение водоизмещения судов, для которых подтверждаются вышеуказанные гипотезы. Приведены преимущества применения разработанной модели катодной защиты морских судов и плавучих технических сооружений от локальных форм коррозионно-механических разрушений при потенциале незаряженной поверхности на ювенильной поверхности стали. Подготовлен регламент действий и перечень документов необходимых для совершенствования технических требований к защитному потенциалу систем катодной защиты для различных категорий судостроительных сталей с целью выявления неточностей значений защитного потенциала и его изменения, что даст положительный эффект при проектировании конструкций судов.

**Ключевые слова:** проектирование судов, защитный потенциал, электрохимическая защита, нагрузка масс судна, экономическая эффективность, технические требования.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01321, <https://rscf.ru/project/22-29-01321/>.

**Для цитирования:** Душко В.Р., Иванова О.А., Крамарь В.А., Родькина А.В. Совершенствование методик проектирования судов в аспекте регламента технических требований к электрохимической защите. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 44—51

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.006>

## Ship design methods improving in the aspect of the technical requirement regulations for electrochemical protection

Veronika R. Dushko<sup>1</sup> v.r.dushko@mail.ru, Olga A. Ivanova<sup>1,2</sup> o.a.ivanova.kmt@mail.ru,

Vadim A. Kramar<sup>1</sup> kramarv@mail.ru, Anna V. Rodkina<sup>1</sup> a.v.rodkina@mail.ru

<sup>1</sup>Sevastopol State University, <sup>2</sup>Central Design Bureau "Corall" JSC

**Abstract.** In order to substantiate the prerequisites for revising the technical requirements for the protective potential of the cathodic protection systems regulations for various categories of shipbuilding steels, a type of electrochemical protection has been identified that has a smaller mass in the load of the vessel masses, a feasibility study for the use of this protection type has been carried out, the minimum value of the ships displacement has been determined, for which the above hypotheses are confirmed. The advantages of using the cathodic protection developed model of marine vessels and floating technical structures from local forms of corrosion-mechanical damage at the potential of an uncharged surface on a juvenile steel surface are given. A regulation of actions and a list of documents necessary to improve the technical requirements for the protective potential of cathodic protection systems for various categories of shipbuilding steels have been prepared in order to identify inaccuracies in the values of the protective potential and change it, which will have a positive effect in the design of ship structures.

**Key words:** ship design, protective potential, electrochemical protection, vessel mass load, economic efficiency, technical requirements.

**Financial Support:** The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-29-01321, <https://rscf.ru/en/project/22-29-01321/>.

**For citation:** Veronika R. Dushko, Olga A. Ivanova, Vadim A. Kramar, Anna V. Rodkina, Ship design methods improving in the aspect of the technical requirement regulations for electrochemical protection. 2022. Part. 1, no. 1. P. 44—51

### Введение

Согласно «Стратегии социально-экономического развития города Севастополя до 2030 года» миссия города Севастополь одним из приоритетных направлений предусматривает развитие судостроения и судоремонта. Определяющую роль в стратегии развития города Севастополь играют

судостроительные предприятия, которые осуществляют проектирование, постройку и ремонт судов всех типов. К 2030 году в структуре занятости экономически активного населения судостроение и судоремонт обеспечит создание дополнительно до шести тысяч рабочих мест. Численность занятых в отрасли возрастет в три раза по отношению к показателю 2015 года и составит 8,9 тыс. Такой рост

трудоустроенных на предприятия сферы судостроения и судоремонта способствует появлению значительного количества объектов их работы, в возможный перечень которых входят: буксиры; плавучие мастерские; гидрографические суда; плавучие буровые платформы (самоподъемные, полупогружные); морские стационарные платформы; причалы; буи и другие суда и плавучие технические сооружения. Данные объекты в большинстве случаев выполняются из различных категорий судостроительных сталей и предусматриваются для эксплуатации в морских водах различной солёности, что провоцирует интенсивные коррозионные процессы. Вследствие коррозионно-механических разрушений происходит потеря прочности и устойчивости корпусных конструкций, что неминуемо ведет к гибели судов и плавучих технических сооружений, перечисленные факторы указывают на необходимость защиты этих объектов от коррозии, коррозионно-механических разрушений и обрастания.

На практике электрохимическая защита корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений, находящиеся в морской воде, является наиболее эффективным способом защиты от коррозионно-механических разрушений, существует два вида: катодная поляризация протекторами или наложенным током. Технические требования регламентирующих нормативных документов [1–6] отличаются и требуют уточнения.

Цель исследования: обоснование предпосылок к пересмотру технических требований по защитному потенциалу регламента систем катодной защиты для различных категорий судостроительных сталей.

#### Определение нагрузки масс защиты от коррозии на стадии проектирования судна

Требования Правил и Норм классификационных обществ основаны на предположении, что при постройке и в эксплуатации судов осуществляются меры по защите корпуса от коррозии в соответствии с действующими стандартами и иными действующими нормативными документами. В соответствии с ОСТ5Р.0206–2002 «Нагрузка масс гражданских и вспомогательных судов» разные виды защиты от коррозии входят в нагрузку масс и должны быть определены еще на стадии проектирования.

В процессе сравнения масс Защиты катодной корпусов судов [5] и Защиты протекторной корпусов судов [6] в составе нагрузки масс судов различного назначения обнаружено уменьшение нагрузки масс защиты от коррозии в случае применения катодной защиты вместо протекторной. Данный эффект наблюдается для судов с водоизмещением более 3400 т (рис. 1). Выявлена важность оценки нагрузки масс различных типов защиты от коррозии на начальных стадиях проектирования с целью определения минимальной по массе [7].

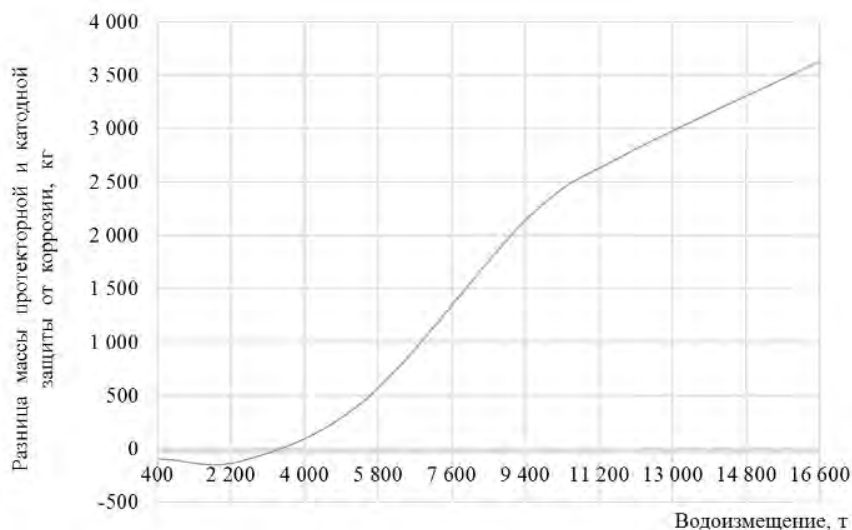


Рис. 1. Обоснование выбора типа защиты от коррозии в зависимости от влияния на нагрузку масс судна

Учитывая, что большинство судов имеют водоизмещение более 3400 т., рекомендовано применять катодную защиту корпусов судов и плавучих технических сооружений.

#### Экономическое обоснование выбора типа защиты от коррозии

Для оценки экономической эффективности применения катодной защиты выполнено сравнение стоимости протекторной и катодной защиты корпусов судов [8]. В целях учета фактора времени расчет выполнялся с использованием способа корректировки денежной единицы по схеме сложного процента.

Выявлена зависимость увеличения разницы затрат за весь период эксплуатации на защиту от коррозии с увеличением водоизмещения судна. Достоверность результатов обеспечивается непротиворечивостью данным других исследований. Выполнено сопоставление материальных затрат на катодную и протекторную защиты за весь период эксплуатации судна (принято 35 лет), на примере сухогрузного судна «Адлер» (рис. 2) видно, что суммарная стоимость катодной защиты становится меньше протекторной до достижения 8 лет эксплуатации.

Определено, что экономически эффективно применять систему катодной защиты для судов с водоизмещением более 6000 т. (рис. 3).

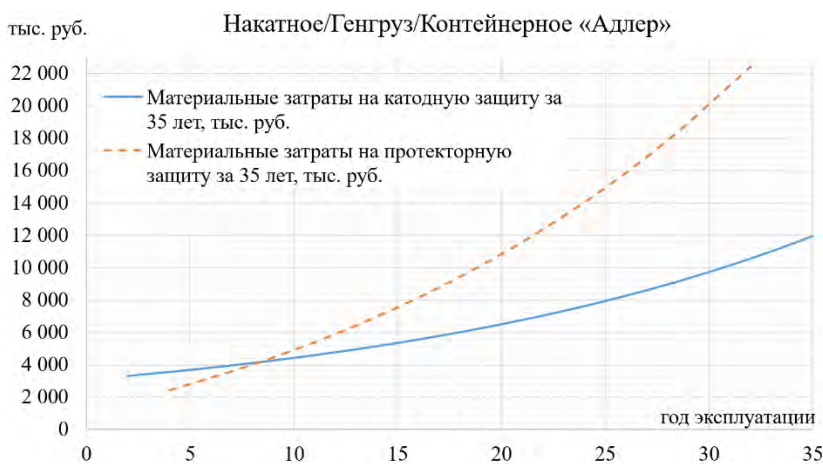


Рис. 2.

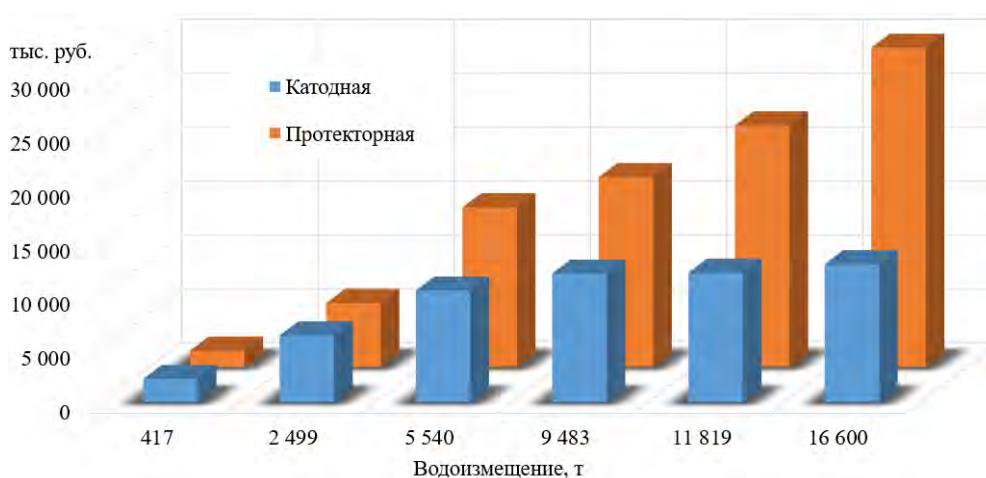


Рис. 3. Материальные затраты на защиту от коррозии за 35 лет

Учитывая, что площадь смоченной поверхности плавучих технических сооружений значительно превышает данную величину судов с водоизмещением 6000 т, то рекомендовано применять катодную защиту для них, основываясь на экономической выгоде [8].

### Защита корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений от локальных коррозионно-механических разрушений

Преимущество меньшей нагрузки масс при применении катодной защиты от коррозии и экономическая выгода ее применения недостаточны для настоящей рекомендации применения именно этого вида защиты, учитывая разницу в параметрах катодной поляризации электрическим током в нормативных документах, например, согласно [1] для обеспечения полноценной защиты необходим сдвиг потенциала стали от стационарного в морской воде на 0,05–0,1 В; согласно [4] – сдвиг потенциала стали от стационарного в морской воде на 0,2–2,15 В; согласно [2] защитный потенциал может изменяться от -0,75 до -0,95 В. Указанные параметры не принимают во внимание наличие локальных коррозионно-механических разрушений.

На основании проведенных исследований [9] учет указанных разрушений, а именно исходных значений потенциалов ювенильной поверхности металла при определении защитного потенциала, необходимо, что

ведет к обоснованию рекомендации по корректировке существующих регламентных требований к защитному потенциалу систем катодной защиты корпусных конструкций морских судов и плавучих технических сооружений.

Определение обновленных значений защитного потенциала возможно на основе разработанной модели катодной защиты морских судов и плавучих технических сооружений от локальных форм коррозионно-механических разрушений при потенциале незаряженной поверхности на ювенильной поверхности стали [10] и программе определения защитного потенциала для корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений [11, 12]. Также, применение этой модели катодной защиты наложенным током при потенциале незаряженной поверхности на ювенильной поверхности стали способствует возникновению нескольких положительных эффектов, на данный момент измеряемых в качественном показателе. Определение количественного значения влияния данных эффектов может являться перспективой дальнейших исследований, так как нуждается в дополнительной проработке и натурных исследованиях в процессе длительной эксплуатации морских судов и плавучих технических сооружений. Рассмотрим их подробно.

Правила Регистра [13] требуют при выполнении расчетов прочности корпусных конструкций, учета

снижения толщины листов за счет коррозионного износа к середине срока службы. Величина запаса на износ, мм, принимается для корпусных конструкций, планируемый срок службы которых превышает 12 лет, определяется по формуле:  $\Delta S = u \cdot (T-12)$ , где  $u$  – среднегодовое уменьшение толщины связи, мм/год, вследствие коррозионного износа или истирания;  $T$  – планируемый срок службы конструкции, годы, если срок службы не устанавливается, то принимается  $T = 24$  года. Среднегодовое уменьшение толщины элементов

корпусных конструкций наружной обшивки судна определяется в зависимости от предусмотренного Правилами Регистра разделения всех судов по условиям коррозионного износа на две группы: I – сухогрузные суда и аналогичные им по условиям эксплуатации; II – наливные суда, суда для навалочных грузов, комбинированные суда и аналогичные им по условиям эксплуатации. Взаимодействующие с катодной защитой конструкции представлены в таблице 2.

Таблица 1

Среднегодовое уменьшение толщины элементов конструкций корпуса [13]

| №     | Элемент конструкции корпуса   | u, мм/год |           |
|-------|---|-----------|-----------|
|       |   | группа I  | группа II |
| 2     | Бортовая обшивка  |           |           |
| 2.1   | Борт при отсутствии второго борта:  |           |           |
| 2.1.1 | надводный   | 0,1       | 0,13      |
| 2.1.2 | в районе переменных ватерлиний  | 0,17      | 0,19      |
| 2.1.3 | ниже района переменных ватерлиний   | 0,14      | 0,16      |
| 2.2   | Борт при наличии второго борта (отсеки двойного борта не предназначены для заполнения):               |           |           |
| 2.2.1 | надводный   | 0,1       | 0,1       |
| 2.2.2 | в районе переменных ватерлиний  | 0,17      | 0,17      |
| 2.2.3 | ниже района переменных ватерлиний   | 0,14      | 0,14      |
| 2.3   | Борт при наличии второго борта (отсеки двойного борта предназначены для груза, топлива или балласта): |           |           |
| 2.3.1 | надводный:  |           |           |
|       | . 1 цистерна заполнена топливом   | 0,19      | 0,19      |
|       | .2 цистерна для приема балласта   | 0,21      | 0,21      |
| 2.3.2 | в районе переменных ватерлиний:   |           |           |
|       | . 1 цистерна заполнена топливом   | 0,18      | 0,18      |
|       | .2 цистерна для приема балласта   | 0,21      | 0,21      |
| 2.3.3 | ниже района переменных ватерлиний:  |           |           |
|       | . 1 цистерна заполнена топливом   | 0,17      | 0,17      |
|       | .2 цистерна для приема балласта   | 0,18      | 0,18      |
| 3     | Днищевая обшивка  |           |           |
| 3.1   | Днище при отсутствии второго дна:   |           |           |
| 3.1.1 | включая скулу   | 0,14      | –         |
| 3.1.2 | в районе грузовых танков  | –         | 0,17      |
| 3.1.3 | в районе топливных цистерн  | 0,17      | 0,17      |
| 3.1.4 | в районе балластных отсеков   | 0,2       | 0,2       |
| 3.2   | Днище при наличии второго дна:  |           |           |
| 3.2.1 | включая скулу   | 0,14      | 0,14      |
| 3.2.2 | в районе топливных цистерн  | 0,15      | 0,15      |
| 3.2.3 | в районе балластных отсеков   | 0,2       | 0,2       |

Однако, применяя предложенный метод защиты корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений катодной поляризацией от локальных форм коррозионно-механических разрушений при потенциале незаряженной поверхности на ювенильной поверхности стали можно достичь уменьшения скорости коррозии стали в морской воде, что впоследствии позволит уменьшить значение среднегодового уменьшения толщины стали в районе наружной обшивки судна и подводной части плавучих технических сооружений. Таким образом, величина запаса на износ  $\Delta S$  уменьшится, что позволит применять для элементов корпусных конструкций стали меньшей толщины, сократив массу емкого раздела нагрузки масс «Корпус». Следовательно, для грузовых судов можно увеличить массу перевозимого груза, что положительно повлияет на экономическую эффективность.

Также при выборе типа защиты необходимо учитывать и другие положительные эффекты от

применения катодной защиты наложенным током при потенциале незаряженной поверхности на ювенильной поверхности стали, нуждающиеся в дополнительной проработке и натуральных исследованиях в процессе длительной эксплуатации морских судов и сооружений.

Предложенный метод защиты позволяет производить мониторинг показателей и управлять защитным потенциалом, устанавливая значение для защиты корпусных конструкций от общей коррозии или комплексно, то есть с учетом локальных коррозионно-механических разрушений. Точность применяемого значения защитного потенциала позволит увеличить междоковый период эксплуатации корпусов морских судов и плавучих технических сооружений, если для них предусмотрена возможность докования.

Применение установленных заподлицо анодных узлов (например, [14] или [15]) уменьшает влияние катодной защиты от коррозии на сопротивление движению судна, в то время как протекторная защита



крепится на корпус судна и создает дополнительное сопротивление. Также на сопротивление влияют продукты жизнедеятельности микроорганизмов, способствующие обрастанию подводной части корпусов судов и сооружений. Использование предлагаемого метода защиты может оказать положительное влияние на борьбу с обрастанием корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений. Однако, для подтверждения этого требуется детальное изучение взаимодействия процессов, способствующих обрастанию, и процессов, происходящих при катодной поляризации стальных корпусных конструкций.

Исключается необходимость замены элементов защиты в течение всего срока службы корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений, с возможным увеличением этого периода, принимая во внимание, что регламентируемый разработчиками срок службы анодных узлов составляет 30 и более лет.

Приведенные положительные эффекты от применения катодной защиты наложенным током при потенциале незаряженной поверхности на ювенильной поверхности стали позволяют повысить долговечность корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений, обеспечивая возможность их нормальной эксплуатации после истечения расчетного срока службы при надлежащем техническом обслуживании.

#### **Совершенствование технических требований к защитному потенциалу систем катодной защиты для различных категорий судостроительных сталей**

Совершенствование технических требований к защитному потенциалу систем катодной защиты для различных категорий судостроительных сталей заключается в уточнении требований к электрохимической защите от коррозии стальных корпусов морских судов и технических сооружений (катодной защите) и возможно будет сформулировать только после апробации полученных результатов в производстве, что позволит:

- рассмотреть технологическую возможность изготовления катодной защиты и ремонтпригодность в условиях судоремонтных заводов;

- уточнить диапазон защитного потенциала с учетом ювенильной поверхности с целью получения максимальной эффективности электрохимической защиты, а также определить диапазон плотности тока на защищаемой поверхности и диапазон потенциала коррозии;

- выполнить обоснование применения электрохимической защиты с учетом условий эксплуатации сооружения (изменении солёности и температуры морской среды);

- разработать электрические и монтажные схемы и инструкции по эксплуатации.

Для подготовки технических требований необходимо будет выполнить следующее:

- создать рабочую группу, состоящую из представителей различных предприятий и организаций, являющимися экспертами в данной области;

- подготовить сведения о гармонизации стандарта на международном или региональном уровне (т.е. необходимо определить идентичность межгосударственного стандарта национальному стандарту или иное их соответствие);

- сформулировать сведения о стандарте, взамен которого будет разработан новый стандарт или четко прописать сведения (требования), которые будут изменены;

- разработать стандарт на продукцию и стандарт на технические условия. Кроме того, учитывая, что в реализации требований технических условий участвуют организации, обеспечивающие изготовление, применение, транспортирование, хранение и утилизацию продукции, и ссылки на технические условия приведены в конструкторских, технологических, товаросопроводительных и других документах, необходимо обеспечить унификацию технических условий на разрабатываемые виды продукции по содержанию, оформлению, обозначению и обновлению;

- необходимо разработать правила эксплуатации предложенной системы катодной защиты;

- определить периодичность проверки режима работы катодной системы;

- разработать форму записи результатов контроля с применением разработанной модели катодной защиты морских судов и океанотехнических сооружений на основе применения нейросетевых технологий.

Для подготовки сведений о гармонизации стандарта на международном или региональном уровне необходимо:

- выполнить анализ существующих документов в области стандартизации в нашей стране и на межгосударственном уровне;

- изучить ГОСТы о стандарте, взамен которого будет разработан новый стандарт или четко прописать сведения/требования, которые будут изменены;

- изучить документацию для рассмотрения возможности разработки стандарта на продукцию и стандарта на технические условия, так как большая часть отечественной продукции (не менее 85 %) выпускается по техническим условиям, устанавливающим требования к качеству и безопасности конкретной продукции.

Таким образом, общий перечень документации, подлежащий изучению и анализу, требования которых необходимо учесть при разработке технических условий или стандарта включает:

- 1 ГОСТ 26501-85 Корпуса морских судов Общие требования к электрохимической защите;

- 2 ГОСТ 1.0-2015 Межгосударственный стандарт Межгосударственная система стандартизации. Основные положения (дата введения 2016-07-01);

- 3 ГОСТ 1.2-2015 Межгосударственный стандарт Межгосударственная система стандартизации Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации Правила разработки, принятия, обновления и отмены (дата введения 2016-07-01);

- 4 ГОСТ Р 1.0-2012 Национальный стандарт Российской Федерации Стандартизация в Российской Федерации Основные положения (дата введения 2013-07-01);

5 ГОСТ Р 1.2-2016 Национальный стандарт Российской Федерации Стандартизация в Российской Федерации Стандарты национальные Российской Федерации Правила разработки, утверждения, обновления, внесения поправок, приостановки действия и отмены (дата введения 2016-07-18);

6 ГОСТ Р 1.3-2018 Национальный стандарт Российской Федерации Стандартизация в Российской Федерации Технические условия на продукцию Общие требования к содержанию, оформлению, обозначению и обновлению (дата введения 2019-07-01);

7 ГОСТ 2.114 Единая система конструкторской документации. Технические условия;

8 ГОСТ 2.051 Единая система конструкторской документации. Электронные документы;

9 ГОСТ 8.417 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин;

10 ГОСТ Р 1.6 Стандартизация в Российской Федерации. Проекты стандартов. Правила организации и проведения экспертизы;

11 ГОСТ Р 1.18 Стандартизация в Российской Федерации. Реестр технических условий. Правила формирования, ведения и получения информации;

12 ОК (ИСО/ИНФКО МКС 001-96) 001 Общероссийский классификатор стандартов (ОКС);

13 ОК 005 Общероссийский классификатор продукции (ОКП);

14 РД 31.35.07-83 Руководство по электрохимической защите от коррозии металлоконструкций морских гидротехнических сооружений в подводной зоне;

15 ВСН 39-84 Катодная защита от коррозии оборудования и металлических конструкций гидротехнических сооружений.

## Заключение

Совершенствование технических требований к защитному потенциалу систем катодной защиты для различных категорий судостроительных сталей будет заключаться не только в уточнении требований к электрохимической защите от коррозии стальных корпусов морских судов и технических сооружений (катодной защите), уточнении диапазона защитного потенциала с учетом ювенильной поверхности с целью получения максимальной эффективности электрохимической защиты, но также будет заключаться в разработке документа в соответствии с общетехническими нормами и требованиями; в совместимости программных и технических средств информационных технологий; в подготовке справочных данных для применения к материалам, имеющим различные свойства; в проработке требований к качеству продукции, методам контроля продукции и услуг; в проработке требований, обеспечивающих техническое единство при разработке, производстве, эксплуатации продукции и оказании услуг, в том числе правил оформления технической документации.

Таким образом, применение разработанной модели, с учетом выявленных положительных эффектов, позволит снять вопрос о необходимости окраски и применения систем протекторной защиты для подводной части корпусных конструкций в процессе эксплуатации, уменьшить толщины применяемой стали, сократить общую массу емкого раздела нагрузки масс «Корпус», следовательно, увеличит экономический эффект. Срок эксплуатации подводной части морских судов и плавучих технических сооружений с предложенной защитой значительно возрастет.

## Литература

1. ВСН 39-84 Катодная защита от коррозии оборудования и металлических конструкций гидротехнических сооружений. – Л.: Минэнерго СССР, 1985. – 29 с.
2. ГОСТ 26501-85 Корпуса морских судов. Общие требования к электрохимической защите. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 8 с.
3. РД 31.28.10-97 Комплексные методы защиты судовых конструкций от коррозии. – М.: ЦНИИМФ, 1997. – 169 с.
4. РД 31.35.07-83 Руководство по электрохимической защите от коррозии металлоконструкций морских гидротехнических сооружений в подводной зоне. – М.: Союзморниипроект, 1983. – 15 с.
5. РД 5.9149-83 Единая система защиты от коррозии и старения. Защита катодная корпусов судов. Правила и нормы проектирования. – Л.: Типография НПО «Ритм», 1983. – 21 с.
6. РД 5.9042-80 Единая система защиты от коррозии и старения. Защита протекторная корпусов судов. Правила и нормы проектирования. – Л.: Типография НПО «Ритм», 1980. – 21 с.
7. Родькина, А.В. Защита от коррозии в составе нагрузки масс судна / А.В. Родькина // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019. – Выпуск 60. – С. 68–76.
8. Грамузов, Е.М. Анализ технико-экономических показателей защиты корпусных конструкции судов от коррозии / Е.М. Грамузов, А.В. Родькина, О.А. Иванова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019. – Выпуск 60. – С. 77–90.
9. Родькина, А.В. Экспериментальные исследования судостроительных сталей при катодной поляризации / А.В. Родькина, О.А. Иванова, В.А. Крамарь, В.Р. Душко // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал № 3 том 1 2020 Сквозной номер 49. Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление. – С. 72–83.
10. Kramar, V.; Rodkina, A.; Ivanova, O.; Chernyi, S.; Zinchenko, A. Analysis Technology and Cathodic Protection for Hull Structures of Ships and Floating Facilities. *Inventions* 2021, 6, 74. <https://doi.org/10.3390/inventions6040074>
11. Родькина, А.В. Гибридная нейронная сеть для прогнозирования защитного потенциала подводной части океанотехнических сооружений / А.В. Родькина, В.А. Крамарь, Е.М. Грамузов, О.А. Иванова // Труды Крыловского государственного научного центра. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. – Журнал\_№ 20192. – Том 2. – С. 254–262.

12. Свидетельство № 2019615789 Российская Федерация. Программа определения защитного потенциала для корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений / В.В. Альчаков, В.А. Крамарь, А.В. Родкина, О.А. Иванова. – № 2019614532; заявл. 12.04.2019; зарегистр. 08.05.2019. – 1 с.
13. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. НД № 2-020101-152. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2022. – 337 с.
14. Кузьмин, Ю.Л. Новая система электрохимической катодной защиты судов от коррозии / Ю.Л. Кузьмин, В.Н. Трощенко, Т.Е. Медяник, Г.В. Тарандо, Л.Д. Ротц, Н.Н. Купцова // Судостроение. – СПб.: Центр технологии судостроения и судоремонта, 2003. – № 6. – С. 35–37.
15. Cathelco ICCP hull corrosion protection systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cathelco.com.sg/iccp/>

#### References

1. Minenergo SSSR (1985). VSN 39-84 *Katodnaya zashchita ot korrozii oborudovaniya i metallicheskih konstruksiy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [VSN 39-84 Cathodic corrosion protection of equipment and metal structures of hydraulic structures]. 29 p.
2. Izdatel'stvo standartov (1985). GOST 26501–85 *Korpusa morskikh sudov. Obshchiye trebovaniya k elektrokhimicheskoy zashchite* [GOST 26501–85 Hulls of sea vessels. General requirements for electrochemical protection]. 8 p.
3. TSNIMF (1997). RD 31.28.10–97 *Kompleksnyye metody zashchity sudovykh konstruksiy ot korrozii* [RD 31.28.10–97 Integrated methods for protecting ship structures from corrosion]. 169 p.
4. Soyuzmorniiprojekt (1983). RD 31.35.07–83 *Rukovodstvo po elektrokhimicheskoy zashchite ot korrozii metallokonstruksiy morskikh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v podvodnoy zone* [RD 31.35.07–83 Guidelines for electrochemical protection against corrosion of metal structures of marine hydraulic structures in the underwater zone]. 15 p.
5. Tipografiya NPO «Ritm» (1983). RD 5.9149–83 *Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Zashchita katodnaya korpusov sudov. Pravila i normy proyektirovaniya* [RD 5.9149–83 Unified system of protection against corrosion and aging. Cathodic protection of ship hulls. Rules and norms of design]. 21 p.
6. Tipografiya NPO «Ritm» (1980). RD 5.9042–80 *Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Zashchita protektornaya korpusov sudov. Pravila i normy proyektirovaniya* [RD 5.9042–80 Unified system of protection against corrosion and aging. Protective protection of ship hulls. Rules and norms of design]. 21 p.
7. Rodkina, A.V. (2019). *Zashchita ot korrozii v sostave nagruzki mass sudna* [Corrosion protection as structure of a ship mass load]. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», № 60. P. 68–76.
8. Gramuzov, E.M., Rodkina, A.V., Ivanova, O.A. (2019). *Analiz tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley zashchity korpusnykh konstruksiy sudov ot korrozii* [Analysis of technical and economic indicators of ship hull construction corrosion protection]. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2019. № 60. P. 77–90.
9. Rodkina, A.V., Ivanova, O.A., Kramar, V.A., Dushko, V.R. (2020). *Eksperimental'nyye issledovaniya sudostroitel'nykh staley pri katodnoy polarizatsii* [Experimental research of shipbuilding steels at cathodic polarization]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. Nauchnyy zhurnal. No 3. tom 1 2020. Skvoznoy nomer 49. Tematika: korablestroyeniye, informatika, vychislitel'naya tekhnika i upravleniye. P. 72–83.
10. Kramar, V.; Rodkina, A.; Ivanova, O.; Chernyi, S.; Zinchenko, A. (2021). *Analysis Technology and Cathodic Protection for Hull Structures of Ships and Floating Facilities*. Inventions 2021, 6, 74. <https://doi.org/10.3390/inventions6040074>
11. Rodkina, A.V., Kramar, V.A., Gramuzov, E.M., Ivanova, O.A. (2019). *Gibridnaya neyronnaya set' dlya prognozirovaniya zashchitnogo potentsiala podvodnoy chasti okeanotekhnicheskikh sooruzheniy* [Hybrid neural network enabling protection potential prediction for underwater parts of marine platforms]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. SPb.: FGUP «Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr», 2019. Zhurnal\_№ 20192. Tom 2. P. 254–262.
12. Svidetel'stvo № 2019615789 Rossiyskaya Federatsiya (2019). *Programma opredeleniya zashchitnogo potentsiala dlya korpusnykh konstruksiy sudov i plavuchikh tekhnicheskikh sooruzheniy* [The program for determining the protective potential for hull structures of ships and floating technical structures]. Alchakov, V.V., Kramar, V.A., Rodkina, A.V., Ivanova, O.A. № 2019614532; zayavl. 12.04.2019; zaregistr. 08.05.2019. 1 s.
13. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva (2022). *Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' II. Korpus* [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part II Hull]. 337 p.
14. Kuzmin, YU.L., Troshchenko, V.N., Medyanik, T.Ye., Tarando, G.V., Rotts, L.D., Kuptsova, N.N. *Novaya sistema elektrokhimicheskoy katodnoy zashchity sudov ot korrozii* [New system of electrochemical cathode anticorrosion protection of ships]. Sudostroyeniye. SPb.: Tsentr tekhnologii sudostroyeniya i sudoremonta, 2003. № 6. P. 35–37.
15. *Cathelco ICCP hull corrosion protection systems*. <http://www.cathelco.com.sg/iccp/>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Вероника Ростиславовна Душко**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Инновационное судостроение и технологии освоения шельфа», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: v.r.dushko@mail.ru

**Veronika R. Dushko**, Ph.D. (Eng.), assistant professor, head of the Department of Innovative shipbuilding and shelf development technologies, Sevastopol State University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: v.r.dushko@mail.ru

**Ольга Александровна Иванова**, кандидат технических наук, инженер-конструктор 1-й категории, АО «ЦКБ «Коралл», 299028, г. Севастополь, ул. Репина, 1; доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru

**Olga A. Ivanova**, Ph.D. (Eng), design engineer of 1<sup>st</sup> category, Central Design Bureau “Corall” JSC, Repina, 1, Sevastopol, 299028, Russian Federation; assistant professor of the Department of Ocean engineering and shipbuilding, Sevastopol State University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru

**Вадим Александрович Крамарь**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информатика и управление в технических системах», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: kramarv@mail.ru

**Vadim A. Kramar**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Informatics and Control in Technical Systems, Sevastopol State University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: kramarv@mail.ru

**Анна Владимировна Родкина**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационное судостроение и технологии освоения шельфа», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: a.v.rodkina@mail.ru

**Anna V. Rodkina**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Innovative shipbuilding and shelf development technologies, Sevastopol State University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: a.v.rodkina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена после рецензирования 01.03.2022, принята к публикации 04.03.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved after reviewing 01.03.2022; accepted for publication 04.03.2022.

Научная статья

УДК 620.178.4/.6

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.007>

## Исследование влияния типа связывающего компонента на механические характеристики полимерных композиционных материалов

Али Саламех<sup>1</sup>, a.salameh@mail.ru, Мазен Алсаид<sup>2</sup>, 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.** Судовые надстройки транспортных судов на протяжении многих лет изготавливают из судостроительной стали. В настоящее время тенденция применения легких судостроительных материалов, таких как полимерные композиционные материалы (ПКМ) значительно развивается, поскольку данные материалы обеспечивают уменьшение массы конструкций и сокращают расходы на техническое обслуживание во время эксплуатации судов. Объектом исследования служат легкие судовые надстройки из ПКМ, построенные на транспортных судах с металлическими корпусами. В данной работе экспериментально исследованы прочностные характеристики ПКМ и циклическая долговечность образцов из ПКМ со стальным захватом. Исследование долговечности образцов из ПКМ проводится на экспериментальной установке при условиях нагружения, соответствующих напряженному состоянию надстроек во время эксплуатации на море. Целью данной работы является изучение влияния типа связующего элемента (смола) на пределы прочности ПКМ при растяжении, сжатии и трехточечном изгибе, а также на циклическую долговечность судовых надстроек из ПКМ. Для достижения поставленной цели были изготовлены и испытаны три группы образцов (А, В, С) ПКМ, армированных стекломатом марки EMC-600-1250-E, с применением полиэфирной смолы Яркопол-110 (группа А), Винилэфирной Crystic VE 679 PA (группа В) и эпоксидной ЭД-20 (группа С) в качестве связующего элемента. Результаты проведенных испытаний показывают значительное влияние типа связующего элемента на пределы прочности ПКМ при растяжении, сжатии и трехточечном изгибе, при этом пределы прочности ПКМ с полиэфирной смолой больше, чем у таких же материалов с применением винилэфирной и эпоксидной смол. Результаты исследования циклической долговечности ПКМ свидетельствуют о том, что лучшие показатели циклической долговечности обнаружались у образцов с винилэфирной смолой, а во второй степени у образцов с полиэфирной и эпоксидной смолами. Полученные данные позволяют установить уравнения выносливости максимального 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, стеклянные волокна, смола, надстройка, циклическая долговечность, прочностные характеристики, предел прочности на растяжение, предел прочности на сжатие, предел прочности на изгиб.

**Для цитирования:** Саламех Али, Алсаид Мазен Исследование влияния типа связывающего компонента на механические характеристики полимерных композиционных материалов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 52—62

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.007>

## Investigation of the binding component type effect on the mechanical characteristics of polymer composite materials

Salamekh Ali<sup>1</sup>, e-mail: a.salameh@mail.ru, Mazen Alsaïd<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 Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volga State University of Water Transport”, Astrakhan, Russian Federation, <sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Astrakhan State Technical University”

**Abstract.** The superstructures of carrier ships have been made of shipbuilding steel for many years. Nowadays, the trend of using lightweight shipbuilding materials such as polymer composite materials (PCM) is making progress. This is because such materials provide mass reduction of structures and cut down the maintenance expenses during the ships operation. The research object is light ship superstructures made of PCM fitted on carrier ships with metal hulls. In this paper, the strength characteristics of PCMs and the cyclic durability of PCM samples with steel grip are experimentally investigated. The study of the durability of PCM samples is carried out on an experimental setup under loading conditions corresponding to the tension state of superstructures while operating at sea. The purpose is to study the effect of the type of binder (resin) on the ultimate strength of PCM in tension, compression, and three-point bending as well as on the cyclic durability of ship superstructures made of PCM. To achieve this goal, three groups of PCM samples (A, B, C) were made and tested. They were reinforced with EMC-600-1250-E glass mat using Yarkopol-110 polyester resin (group A), Crystic VE 679 PA vinyl ester (group B), and epoxy ED-20 (group C) as a binders. The results of the tests carried out show significant effect of the binder type on the ultimate strength of PCM in tension,

compression, and three-point bending. The ultimate strength of PCM with polyester resin is greater than that of the same materials using vinyl ester and epoxy resins. The study of the cyclic durability of PCM indicates that the best indicators of cyclic durability were found in samples with vinyl ester resin. The samples with polyester and epoxy resins are on the second place. The data obtained make it possible to establish the equations of the maximum stress endurance from the number of cycles to failure for each group of samples which is the basis for predicting the cyclic durability of lightweight ship superstructures made of PCM.

**Key words:** shipbuilding, polymer composite materials, glass fibers, resin, superstructure, cyclic durability, strength characteristics, tensile strength, compressive strength, ultimate bending strength.

**For citation:** Salamekh Ali, Alsaid Mazen Investigation of the binding component type effect on the mechanical characteristics of polymer composite materials, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 52—62

### Введение

В последние годы выросло количество научных исследований, целью которых является построение судов с более эффективными экономическим показателями и со способностью уменьшения уровня выбросов CO<sub>2</sub> судовыми двигателями в окружающую среду для выполнения международных требований [1]. Рациональным подходом для достижения этой цели служит применение легких судостроительных материалов, таких как полимерные композиционные материалы (ПКМ) и алюминиевые сплавы. ПКМ характеризуются малым удельным весом, что ведет к уменьшению масс конструкций, и высокой стойкостью к морской воде и коррозии, что снижает расходы на техническое обслуживание и повышает срок службы изделия из ПКМ [2].

Отвечая новой мировой тенденции в области использования ПКМ в судостроении и Правилам в новой редакции Российского Морского Регистра Судоходства (РМРС), стали распространяться на надстройки из ПКМ, в том числе, построенные на судовых транспортных судах с металлическими корпусами [3]. Основным отличием ПКМ от традиционных материалов (стали и алюминиевых сплавов) является возможность изготовления судовых конструкций с определенными прочностными характеристиками, выбором компонентов материала (армирующего элемента и типа связующего) и параметров процесса изготовления на раннем этапе проектирования надстроек, что требует тщательного исследования прочностных характеристик и циклической долговечности ПКМ в зависимости от выбранных компонентов в условиях нагружения, например как, воздействуют нагрузки на стены надстроек во время эксплуатации.

В работе [4] проведены испытания влияния количества слоев армирующего элемента из стекломата на предел прочности ПКМ при растяжении и установлено, что увеличение количества слоев приводит к уменьшению предела прочности, хотя разрушающая нагрузка увеличивается. Полученные результаты в работе [5] подтверждают значительное влияние схемы укладки слоев армирующего элемента и наличие ровинговой стеклоткани на пределы прочности ПКМ при растяжении, сжатии и изгибе, при этом обнаружилось, что увеличение количества слоев ровинговой стеклоткани положительно влияет на предел прочности при растяжении и отрицательно на пределы прочности ПКМ при сжатии и изгибе.

Изучение циклической долговечности ПКМ должно проводиться в условиях нагружения, соответствующими нагрузками, действующими на исследованный объект в реальных

эксплуатационных условиях [6]. На основе того, что в данной работе предметом исследования являются легкие судовые надстройки, которые не участвуют в общем изгибе основного корпуса судна и более нагруженной частью надстройки служит нижний пояс, соединенный с металлическим корпусом судна с помощью комингса (рис.1), то на них воздействуют следующие нагрузки (рис.2):

$F_1$  – Статическая сжимающая нагрузка, моделирующая влияния массы надстройки из ПКМ;

$F_2$  – Циклическая изгибающая нагрузка, моделирующая ветровую нагрузку на стены надстройки;

$F_3$  – Инерционная нагрузка, возникающая в результате качки судна на волнении.

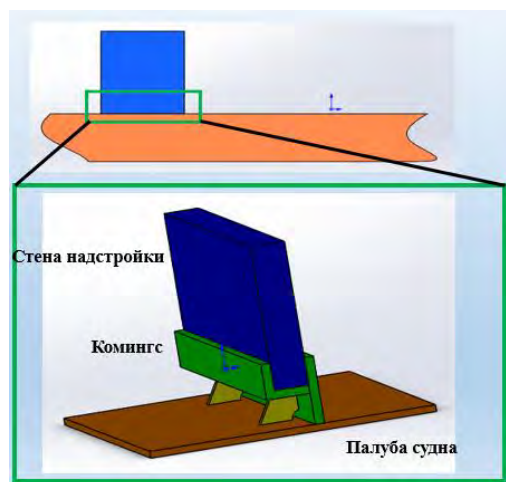


Рис. 1. Объект исследования циклической долговечности надстройки из ПКМ

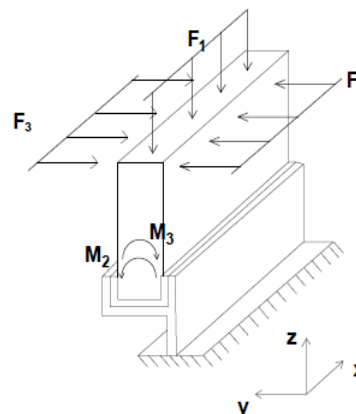


Рис. 2. Действующие нагрузки на стены судовых надстроек в нижнем поясе

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о том, что для обоснования циклической долговечности надстроек из ПКМ, установленных на палубах транспортных судов и исследование их прочностных характеристик в зависимости от условий нагружения надстроек и от типа связующего компонента является актуальной целью.

Объектом исследования являются образцы из ПКМ, армированные стеклянными волокнами с применением различных типов связующего компонента – с применением полиэфирной смолы (группа А), Винилэфирной смолы (группа В) и эпоксидной смолы (группа С).

Задачей данной работы является изучение влияния типа связующего на пределы прочности ПКМ при растяжении, сжатии и трехточечном изгибе, также исследовать влияние данного фактора на циклическую долговечность судовых надстроек из ПКМ.

### 1. Материалы для проведения исследования

Для изготовления судовых надстроек транспортных судов Правила РМРС разрешают использовать терморезистивные полимерные связующие – полиэфирные, винилэфирные и эпоксидные. Также данные правила распространяются на стеклянные, углеродные и арамидные волокна в качестве армирующего элемента [7], при этом в судостроении наибольшее распространение получили стеклянные волокна, что объясняется их минимальной стоимостью, высокой стойкостью к морской воде и достаточными прочностными характеристиками.

В данной работе для исследования влияния типа связующего элемента на прочностные характеристики и циклическую долговечность ПКМ были изготовлены три группы образцов с разными типами связующего (А, В и С). Для всех групп образцов в качестве армирующего элемента был использован эмульсионный стекломат марки (ЕМС-600), одобренный Регистром судоходства Ллойда (Lloyd's Register) для изготовления судовых конструкций судов, находящихся под его надзором [8]. Основные свойства данного компонента приведены в таблице 1.

Таблица 1

#### Физико-технические характеристики армирующего стекломата марки (ЕМС-600)

| Характеристика                            | Значение  |
|---|-----------|
| Масса 1 м <sup>2</sup> , г/м <sup>2</sup> | 600 ± 7,5 |
| Содержание горючих, %                     | 4,0 ± 0,8 |
| Содержание влаги, %                       | ≤ 0,2     |
| Разрывная нагрузка по основе, Н           | ≥160      |
| Разрывная нагрузка по утку, Н             | ≥160      |

В качестве связующего для образцов группы А были использованы полиэфирная смола «Яркопол-110» [9], а для образцов групп В и С – винилэфирная «Crystic VE 679» [10] и эпоксидная «ЭД-20» смолы [11] соответственно. Основные физико-механические характеристики использованных смол приведены в таблицах 2, 3 и 4.

Таблица 2

#### Основные физико-механические характеристики полиэфирной смолы марки «Яркопол-110»

| Характеристика                                       | Значение                                |
|--|---|
| Внешний вид и цвет                                   | Жидкость от синего до фиолетового цвета |
| Удельная 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                                   |
| Модуль упругости при изгибе, МПа                     | 3200-3800                               |
| Изгибающее напряжение при разрушении, МПа            | 70-100                                  |
| Разрушающее напряжение при сжатии, МПа               | 90-140                                  |
| Относительное удлинение при разрыве, %               | 3-5                                     |

Таблица 3

#### Основные физико-механические характеристики винилэфирной смолы марки «Crystic VE 679 РА»

| Характеристика                                  | Значение           |
|---|--------------------|
| Цвет  | Красный/Коричневый |
| Удельная плотность при 25 °С, г/см <sup>3</sup> | 1,065              |
| Время гелеобразования при 25 °С, мин            | 23                 |
| Водопоглощения за 24 ч при 23 °С, мг            | 10                 |
| Предел прочности на растяжение, МПа             | 60                 |

Таблица 4

#### Основные физико-механические характеристики смолы эпоксидной марки «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 омыляемого хлора, %, не более    | 0,3                |
| Массовая доля гидроксильных групп, %, не более | 1,7                |
| Массовая доля летучих веществ, %, не более     | 0,2                |
| Динамическая вязкость, Па·сек, при (25±0.1)°С  | 13-20              |
| Время желатинизации, час., не менее            | 8                  |

Все образцы ПКМ выпиливались из пластин квадратной формы с размерами 600×600 мм, изготовленных методом ручного контактного формования. Для исключения влияния других факторов пластины были изготовлены с одинаковым количеством слоев армирующего элемента: ( $n = 6$ ) - для проведения статических испытаний на растяжение, сжатие и трехточечный изгиб, а ( $n = 9$ ) - для проведения испытаний на циклическую долговечность. Для каждого слоя армирующего элемента была нанесена 400 см<sup>3</sup> связывающего материала независимо от его типа с добавлением стандартной пропорции отвердителя согласно рекомендациям производителя. Отверждение пластин, изготовленных с применением полиэфирной и винилэфирной смол происходило за счет химической реакции смол с отвердителем Бутанокс М-50 пропорции 2,5% и 2 % соответственно. Отверждение пластины с применением эпоксидной смолы ЭД-20 получилось за счет добавление отвердителя марки Полиэтиленполиамин (ПЭПА) со стандартной пропорцией 10%. Здесь необходимо отметить, что до заливки эпоксидной смолой произошел процесс ее нагревания до температуры +25 °С, поскольку данная смола имеет высокую вязкость.

## 2. Исследование влияния типа связующего компонента на прочностные характеристики ПКМ

### 2.1. Методика и результаты испытаний образцов на растяжение

Испытание образцов ПКМ групп (А, В и С) с применением разного типа смол на растяжение проводилось на универсальной испытательной машине типа (Р-5) в соответствии с требованиями ГОСТ 11262-2017 [12]. Образцы для проведения испытаний на растяжение согласно данному ГОСТу должны быть плоские без головки с длиной 250 мм и шириной 25 мм, при этом допускаемое отклонение размеров составляет ±1 мм (рис.3). Количество слоев армирующего элемента для всех изготовленных образцов ( $n = 6$ ), т.е. толщина образцов в среднем составляет 7,5 мм.

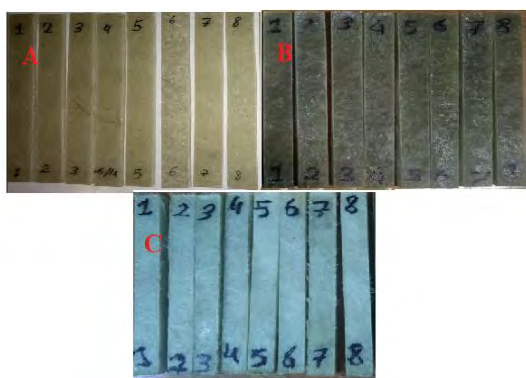


Рис. 3. Изготовленные образцы ПКМ для проведения испытаний на растяжении: А – с полиэфирной смолой; В – с винилэфирной смолой; С – с эпоксидной смолой

Методика проведения испытания на растяжение заключается в фиксировании испытуемого образца между захватами испытательной машины и выполнении нагружения вдоль его оси с фиксированной скоростью перемещения захватов ( $V=5$  мм/мин) (рис.4). Испытание продолжается до момента разрушения образцов и запишется значения разрушающей нагрузки  $F_{max}$ , на основе которой определяется предел прочности ПКМ при растяжении по следующей формуле:

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{F_{max}}{A} \quad (1)$$

где  $F_{max}$  – разрушающая нагрузка, Н;

$A = b \cdot h$  – площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.



Рис. 4. Испытание образцов на машине Р-5 на растяжение

Образцы с разным типом смол после испытаний показаны на рисунке (рис.5) и полученные результаты приведены в таблица 5.

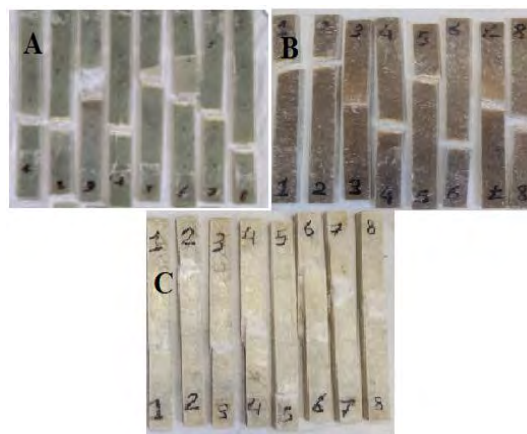


Рис. 5. Образцы ПКМ после проведения испытаний на растяжении: А – с полиэфирной смолой; В – с винилэфирной смолой; С – с эпоксидной смолой



Таблица 5  
Результаты испытаний образцов группы (А, В, С) на растяжение

| № образца        | Предел прочности при растяжении, МПа |     |    |
|------------------|--------------------------------------|-----|----|
|                  | А                                    | В   | С  |
| 1                | 134                                  | 80  | 79 |
| 2                | 119                                  | 101 | 80 |
| 3                | 116                                  | 95  | 89 |
| 4                | 119*                                 | 101 | 92 |
| 5                | 108                                  | 103 | 92 |
| 6                | 106                                  | 93  | 85 |
| 7                | 120                                  | 108 | 76 |
| 8                | 123                                  | 95  | 73 |
| Среднее значение | 118                                  | 99  | 84 |

\* образец сломался вне рабочей зоны, исключается из расчета

При сравнении пределов прочности образцов из ПКМ на растяжение (рис.6) можно заметить, что предел прочности ПКМ с применением полиэфирной смолы (А) превышает пределы прочности с использованием винилэфирной и эпоксидной смолами на 16,1% и 28,81% соответственно.

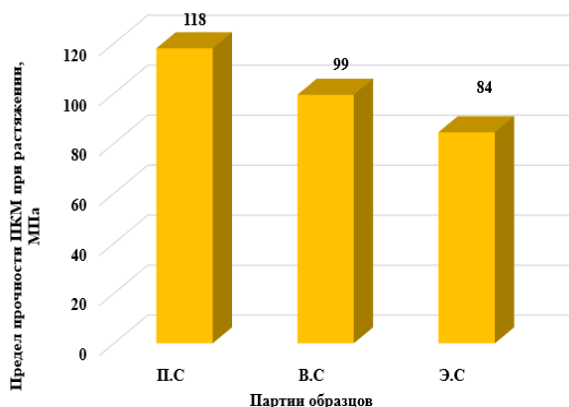


Рис. 6. Сравнение пределов прочности ПКМ на растяжение при различных типах связующего

## 2.2. Методика и результаты испытаний образцов на сжатие

В целях изучения влияния типа связующего компонента на предел прочности ПКМ при сжатии были изготовлены образцы с одинаковым количеством слоев армирующего элемента ( $n = 6$ ) квадратной формы с размерами  $10 \times 10$  мм, причем допускаемое отклонение не должно превышать  $\pm 1$  мм согласно ГОСТу 4651-2014 [13]. Для проведения экспериментов на сжатие помещают испытуемый образец между плоскими опорными площадками испытательной машины Р-5 так, чтобы торцы образца были параллельны поверхностям опорных площадок (рис. 7). Для исключения скольжения образцов во время испытаний между их поверхностями и поверхностями площадок размещают тонкие наждачные бумаги.

Нагружение образца в ходе эксперимента происходит за счет перемещения опорных площадок со скоростью 1 мм/мин и поскольку размеры образцов являются малыми, то затрудняется определить момент разрушения образца визуально, поэтому разрушающая нагрузка определяется в тот момент, когда на указателе испытательной машины резко изменяется передаваемой сжимающей нагрузкой.



Рис. 7. Испытание образцов на машине Р-5 на сжатие

Аналогичным образом запишется разрушающая нагрузка при сжатии  $F_{max}$  и вычисляется предел прочности ПКМ по формуле (1). В таблице 6 приведены результаты испытаний образцов групп (А, В, С) на сжатие.

Таблица 6  
Результаты испытаний образцов группы (А, В, С) на сжатие

| № образца        | Предел прочности при сжатии, МПа |     |     |
|------------------|----------------------------------|-----|-----|
|                  | А                                | В   | С   |
| 1                | 166                              | 136 | 112 |
| 2                | 147                              | 135 | 108 |
| 3                | 167                              | 135 | 66  |
| 4                | 181                              | 133 | 107 |
| 5                | 183                              | 171 | 115 |
| 6                | 220**                            | 123 | 110 |
| 7                | 182                              | 116 | 100 |
| 8                | 178                              | 128 | 92  |
| Среднее значение | 172                              | 130 | 106 |

\*\* данные, исключенные из дальнейшего расчета партия в результате проверки на наличие промахов.

Полученные результаты при проведении испытаний образцов из ПКМ с разными типами смол свидетельствует о том, что предел прочности образцов группы (А) с полиэфирной смолой больше чем такие же пределы при применении винилэфирной и эпоксидной смол на 24,42 % и 38,37 % соответственно (рис. 8).

Разрушение образцов в результате сжатия наблюдается в виде отслоения слоёв или надлома волокон (рис.9).

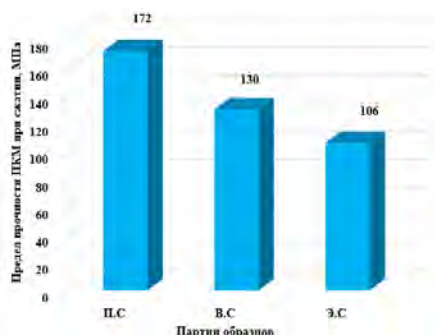


Рис. 8. Сравнение пределов прочности ПКМ на сжатие при различных типах связующего

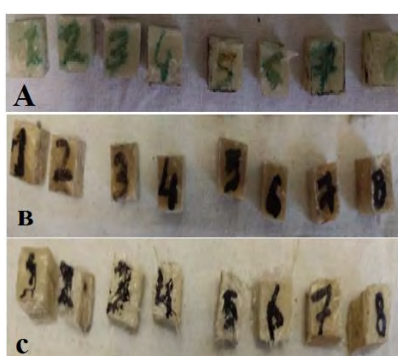


Рис. 9. Образцы ПКМ после проведения испытаний на сжатие: А – с полиэфирной смолой; В – с винилэфирной смолой; С – с эпоксидной смолой

### 2.3. Методика и результаты испытаний образцов на изгиб

Испытания образцов ПКМ с разными типами связующего (А, В, С) на изгиб проводились на испытательной машине (Р-5) согласно ГОСТу 4648-2014 [14], при этом испытуемый образец, свободно лежащий на опорах машины и нагружается в средней части наконечником, до появления трещины и разрушения образца (рис. 10). Расстояние между опорами для всех образцов, равно  $(16 \pm 1) \cdot t = 100$  мм (где  $t$  – средняя толщины образцов). Наконечник перемещается вниз со скоростью нагружения 10 мм/мин, рекомендуемой для материалов, которые разрушаются без четкого выражения значения изгибающего напряжения при максимальной нагрузке.



Рис. 10. Испытание образцов на машине Р-5 на трехточечный изгиб

Испытания на изгиб проводились на плоских прямоугольных образцах длиной 200 мм и шириной 20 мм с 6 слоями армирующего элемента эмульсионного стекломата марки (ЕМС-600). Изготовленные образцы ПКМ для проведения испытаний на изгиб показаны на рис. 11.

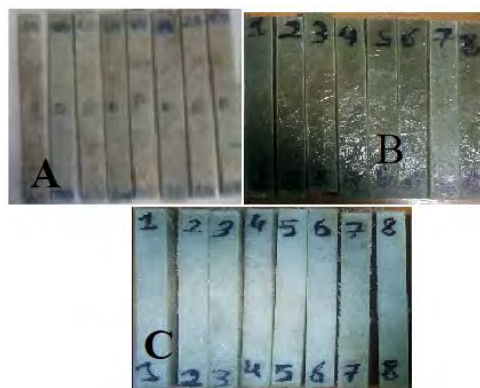


Рис. 11. Изготовленные образцы ПКМ для проведения испытаний на изгиб: А – с полиэфирной смолой; В – с винилэфирной смолой; С – с эпоксидной смолой

Разрушение всех испытуемых образцов, в независимости от типа связующего, произошло от растяжения нижних слоев образца с последующим разрывом и расслоением слоев тканей (рис.12).

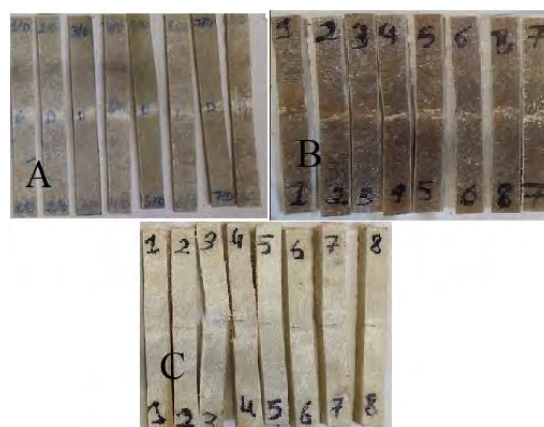


Рис. 12. Образцы ПКМ после проведения испытаний на изгиб: А – с полиэфирной смолой; В – с винилэфирной смолой; С – с эпоксидной смолой

Максимальная нагрузка  $F_{max}$  определяется на указателе испытательной машины и на основе ее вычисляется предел прочности ПКМ при изгибе по следующей формуле:

$$\sigma_B^И = \frac{3F_{max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot t^2} \quad (2)$$

где  $l$  – расстояние считается между опорами, сравнение мм;

$b$  – ширина укладки образца, влияния мм;

$t$  – Толщина среднего образца, араמידные мм.

Результаты испытаний образцов из ПКМ с применением разных типов смол приведены в таблице 7.

Результаты испытаний образцов (А, В, С) (рис. 13) показывают, что у образцов с полиэфирной смолой лучше показатели предела прочности при изгибе, при этом предел прочности образцов с полиэфирной больше пределов прочности образцов с

применением винилэфирной смолы на 18,63 %, и на 37,26 % при использовании эпоксидной смолы в качестве связующего компонента материалов.

Таблица 7

Результаты испытаний образцов группы (А, В, С) на изгиб

| № образца        | Предел прочности при изгибе, МПа |     |     |
|------------------|----------------------------------|-----|-----|
|                  | А                                | В   | С   |
| 1                | 267                              | 205 | 160 |
| 2                | 266                              | 211 | 166 |
| 3                | 262                              | 184 | 165 |
| 4                | 251                              | 228 | 177 |
| 5                | 284                              | 212 | 147 |
| 6                | 272                              | 226 | 157 |
| 7                | 242                              | 224 | 173 |
| 8                | 263                              | 225 | 173 |
| Среднее значение | 263                              | 214 | 165 |

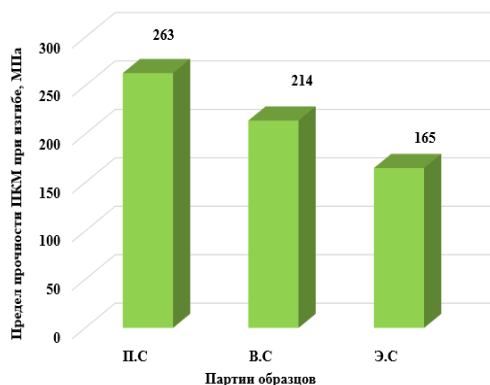


Рис. 13. Сравнение пределов прочности ПКМ на изгиб при различных типах связующего

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

Исследование влияния типа связующего компонента на циклическую долговечность судовых надстроек, изготовленных из ПКМ осуществлялось на разработанной и запатентованной экспериментальной установке (рис. 14) [15], которая позволяет испытывать образцы ПКМ и определить число циклов до разрушения образца (N) при условиях нагружения, моделирующих нагрузки на нижний пояс стены надстройки во время эксплуатации судна. Основными источниками напряженного состояния в этой части надстройки являются ветровая нагрузка, нагрузка от собственного веса надстройки и инерционные составляющие, возникающие в результате качки судна на волнении.

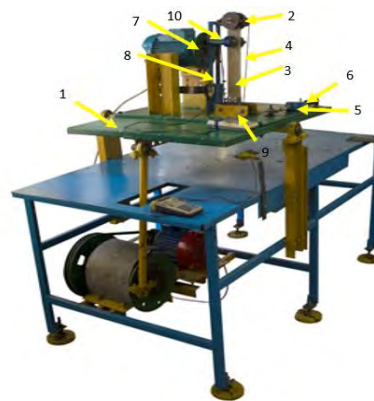


Рис. 14. Экспериментальная установка для проведения испытаний на циклическую долговечность

Спроектированная установка конструктивно состоит из трех механизмов, создающих три составляющих напряжения ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) на испытуемый образец:

- механизм качки, который обеспечивает колебательное движение платформы (1) и, следовательно, возникновение инерционных составляющих  $F_1$  в результате закрепления грузов (2) в верхней части испытуемого образца (3);

- механизм статического нагружения, состоящий из металлического троса (4), динамометра (5) и талрепа (6), которые используются для регулировки сжимающей силы  $F_2$  на образец;

- кулисный механизм, моделирующий ветровой нагрузки на стены надстройки  $F_3$  и обеспечивающий колебательное движение испытуемого образца (3) с помощью проведённого диска (7) и кулисы (8).

До включения электродвигателей и работы установки испытуемый образец закрепляют в неподвижном (9) и подвижном (10) захватах. До разрушения образца определяется количество циклов (N) с помощью счетчика циклов.

Напряжения, возникающие в сечении образца в зоне закрепления в неподвижном захвате в результате действия нагрузок  $F_1, F_2$  и  $F_3$ , определяется скалярной суммой:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3)$$

Испытания на циклическую долговечность проводились на образцы ПКМ размерами 450 мм и 60 мм и с количеством слоев армирующего элемента ( $n=9$ ). Были изготовлены 3 группы образцов, изготовленных на основе эмульсионного стекломата марки (EMC-600) с разными типами смол – полиэфирной (А), винилэфирной(В) и эпоксидной (С) (рис.15). Для всех образцов испытания на циклическую долговечность проводились с частотой нагружения (5 Гц) и коэффициентом асимметрии цикла ( $R=-1$ ), при этом на каждом уровне напряжения были испытаны 5 образцов до разрушения. Результаты испытаний образцов групп (А, В, С) на циклическую долговечность приведены в таблице 8.

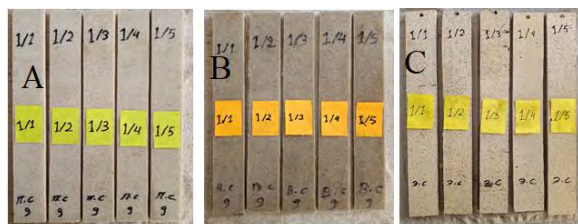


Рис. 15. Изготовленные образцы ПКМ для проведения испытаний на циклическую долговечность: А – с полиэфирной смолой; В – с винилэфирной смолой; С – с эпоксидной смолой

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 при каждом типе связующего в координатах ( $\sigma$ - lg (N)) (рис. 16), (рис. 17) и (рис. 18):

- для образцов ПКМ с полиэфирной смолой:  
 $\sigma = 318,6 - 37,16 \lg(N)$
- для образцов ПКМ с винилэфирной смолой:  
 $\sigma = 324,9 - 37,17 \lg(N)$
- для образцов ПКМ с эпоксидной смолой:  
 $\sigma = 316,0 - 37,36 \lg(N)$

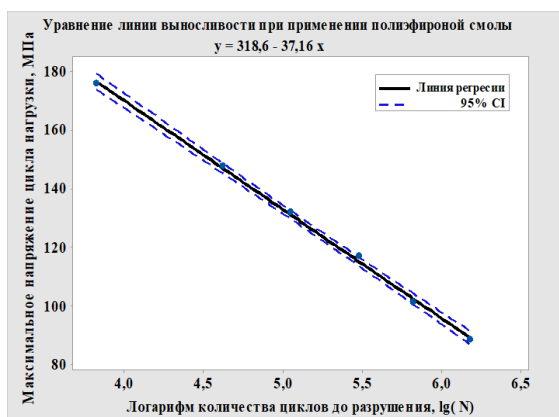


Рис. 16. Линия выносливости ПКМ при применении полиэфирной смолы «Яркопол-110»

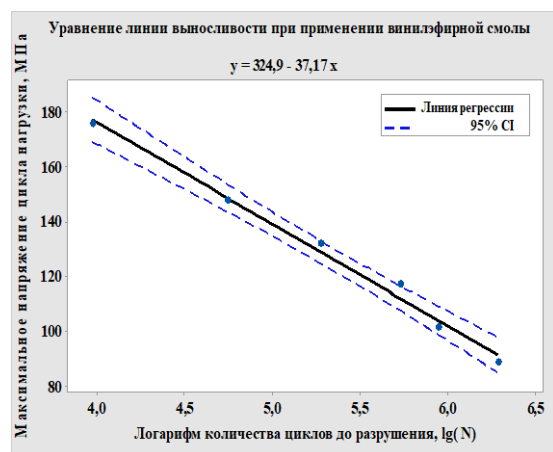


Рис. 17. Линия выносливости ПКМ при применении винилэфирной смолы «Crystic VE 679 PA»

Таблица 8  
Результаты испытаний образцов ПКМ группы (А, В, С) на циклическую долговечность

| № образца                      | σ, МПа | Тип связующего |         |         |
|--------------------------------|--------|----------------|---------|---------|
|                                |        | А              | В       | С       |
| Число циклов до разрушения (N) |        |                |         |         |
| 1                              | 176    | 6430           | 9041    | 4987    |
| 2                              |        | 6179           | 8791    | 5360    |
| 3                              |        | 6978           | 9347    | 5981    |
| 4                              |        | 7239           | 10471   | 4671    |
| 5                              |        | 6221           | 9573    | 5090    |
| 1                              | 148    | 43250          | 55791   | 29825   |
| 2                              |        | 38971          | 51833   | 33984   |
| 3                              |        | 40621          | 57800   | 37429   |
| 4                              |        | 45607          | 59871   | 32884   |
| 5                              |        | 37985          | 52943   | 35941   |
| 1                              | 132    | 115779         | 194231  | 85743   |
| 2                              |        | 103471         | 187207  | 80498   |
| 3                              |        | 110569         | 190995  | 92573   |
| 4                              |        | 105662         | 182708  | 82741   |
| 5                              |        | 113417         | 181934  | 89049   |
| 1                              | 117    | 331552         | 572408  | 240874  |
| 2                              |        | 292108         | 548721  | 279204  |
| 3                              |        | 288098         | 521810  | 268423  |
| 4                              |        | 302256         | 530085  | 257447  |
| 5                              |        | 282169         | 519427  | 251793  |
| 1                              | 101    | 653309         | 880971  | 495558  |
| 2                              |        | 685582         | 910235  | 521369  |
| 3                              |        | 663079         | 859705  | 482912  |
| 4                              |        | 635189         | 901938  | 508741  |
| 5                              |        | 648872         | 860134  | 502479  |
| 1                              | 89     | 1490846        | 1985234 | 1050891 |
| 2                              |        | 1572147        | 1821479 | 1198447 |
| 3                              |        | 1530190        | 2060297 | 1260910 |
| 4                              |        | 1510631        | 1903847 | 985743  |
| 5                              |        | 1380918        | 1882466 | 1158308 |

Анализ полученных результатов при проведении испытаний образцов ПКМ в условиях нагружения, моделирующих нагрузки на судовые надстройки показывают, что циклическая долговечность ПКМ существенно зависит от типа связующего компонента. Установлено, что при одинаковых уровнях напряжения лучшие показатели циклической долговечности обнаружались у образцов, изготовленных с применением винилэфирной смолы, а во второй степени у образцов с полиэфирной и эпоксидной смол. Циклическая долговечность ПКМ с винилэфирной смолой в среднем больше чем долговечность с полиэфирной смолой на 31% и на

45% по сравнению с долговечностью ПКМ с эпоксидной смолы (рис. 19).

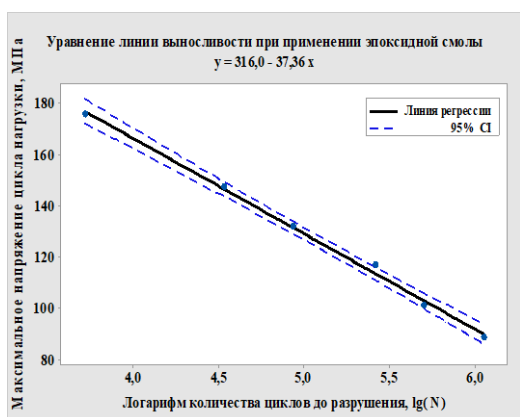


Рис. 18. Линия выносливости ПКМ при применении эпоксидной смолы ЭД-20

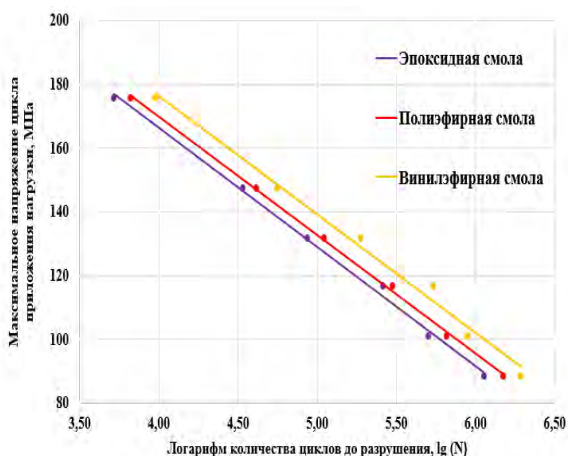


Рис. 19. Графики уравнений выносливости ПКМ при разных типах смол в координатах  $\sigma - \lg(N)$

Для всех образцов, испытываемых на циклическую долговечность характерно разрушение в месте закрепления в неподвижном захвате, которое является зоной концентрации напряжений (рис. 20).

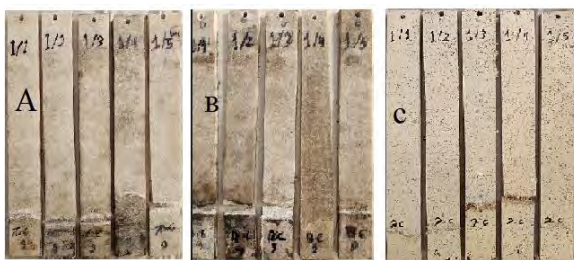


Рис. 20. Испытуемые образцы ПКМ на циклическую долговечность: А – с полиэфирной смолой; В – с винилэфирной смолой; С – с эпоксидной смолой

Для проверки правильности экспериментальных результатов, полученных на основе уравнений выносливости в программе Microsoft Excel были построены графики соотношений максимального напряжения от количества циклов до разрушения в координатах  $(\sigma_{\max}-N)$  (рис.21).

Общее уравнение выносливости ПКМ в координатах  $(\sigma_{\max}-N)$  имеет следующий вид:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot N^{-\frac{1}{K}} \quad (4)$$

Где  $\sigma_0$  и  $K$  – коэффициенты графика линии выносливости, причем значения коэффициент  $K$  находятся другие в диапазон от 7 до 25, т.е.  $1/K=0,04 \dots 0,14$  [6, 16]

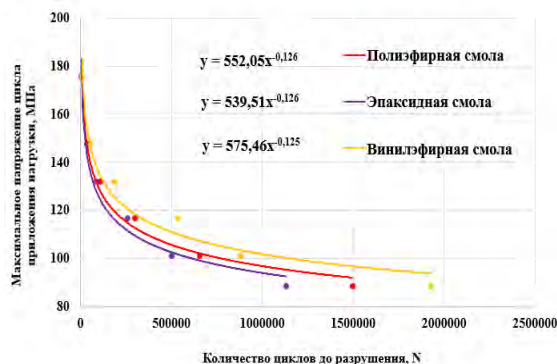


Рис. 21. Графики уравнений выносливости ПКМ при разных типах смол в координатах  $(\sigma - N)$

Сравнение значений коэффициентов степенных уравнений с полученными коэффициентами в работах [6,16] указывает на достоверность экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний на циклическую долговечность и о возможности использования уравнения, установленные на их основе в практике построения легких судовых надстроек из ПКМ, армированных стеклянными волокнами.

### Заключение

В данной работе рассмотрено влияние типа связующего компонента на прочностные характеристики и циклическую долговечность ПКМ. Были изготовлены три группы образцов ПКМ на основе эмульсионного стекломата марки (ЕМС-600) с применением различных типов связующего: А – с полиэфирной смолой, В – с винилэфирной и С – с эпоксидной.

Изготовленные образцы были испытаны на растяжение, сжатие и трехточечный изгиб. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предел прочности образцов ПКМ с применением полиэфирной смолы больше, чем пределы таких же образцов с использованием винилэфирной и эпоксидной смолами. Предел прочности ПКМ с полиэфирной смолой при растяжении превышает пределы прочности ПКМ с винилэфирной и эпоксидной смолами на 16,1% и 28,81% соответственно. При испытаниях на сжатие обнаружено, что предел прочности образцов с полиэфирной смолой больше на 24,42% и 38,31 по сравнению с образцами с винилэфирной и эпоксидной смолами. Испытания на трехточечный изгиб показывают, что предел прочности образцов с полиэфирной смолой больше, чем пределы прочности с винилэфирной и эпоксидной смолами на 18,32% и 37,26% соответственно.

В данной работе также были проведены испытания образцов с разными типами смол на циклическую долговечность в условиях напряжения, моделирующих нагрузки на стены судовых надстроек, в частности, ветровая нагрузка, весовая

нагрузка и инерционные составляющие, возникающие в результате качки судна. Испытания проводились на запатентованной установке, разработанной специально для этой цели. Были испытаны три группы образцов (А, В, С) и в результате проведенных испытаний можно прийти к выводу, что лучшие показатели циклической долговечности найдены у образцов с винилэфирной смолой, а во второй степени у образцов с полиэфирной и эпоксидной смолами, причем циклическая долговечность образцов с винилэфирной смолой в среднем показатели превышает долговечность образцов с полиэфирной и эпоксидной смолами на 31% и 45% соответственно.

Результаты, полученные в ходе исследования являются основанием для прогнозирования прочностных характеристик и циклической долговечности судовых надстроек, изготовленных из ПКМ и построенных на судах с металлическими корпусами.

Для дальнейшего исследования актуальным вопросом является изучение влияния других факторов, таких как схема укладки слоев армирующего элемента и состав материалов на циклическую долговечность легких судовых надстроек из ПКМ.

### Литература

1. Cost and weight of composite ship structures: A parametric study based on Det Norske Veritas rules.
2. Tawfik B. Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials/B. Tawfik, H. Leheta, A. Elhewy, T. Elsayed// International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. Vol. 9. Is. 2. Pp. 185-198.
3. Кутейников М.А. Разработка новых правил по конструкции и прочности морских судов из полимерных композиционных материалов/М.А. Кутейников, С.М. Кордонец, Н.Н. Федонюк//Научно-технический сборник российского морского регистра судоходства. – 2017. – № 46-47. –с. 64-71.
4. Алсаид.М. Исследование прочностных характеристик полимерных композиционных материалов при растяжении /М. Алсаид, А. Саламех// Морские интеллектуальные технологии. – 2019. –№ 3 (45) Т.3. – с. 18-26.
5. Алсаид , М., Саламех , А., Мамонтов , В. А., & Азизова , Г. У. (2020). Сравнительный анализ результатов механических испытаний многослойного полимерного композитного материала. Научные проблемы водного транспорта, (63), 27-39. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.73>
6. Anastasios P. Vassilopoulos. Fatigue of Fiber-reinforced Composites / Vassilopoulos. A.V, Keller.T// Engineering Materials and Processes. Springer, – 253 P.
7. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVI. Конструкция и прочность корпусов судов из полимерных композиционных материалов. –СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019,151с.
8. 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).
9. 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).
10. Crystic VE 679 PA DCPD-Модифицированная винил эфирная смола для изготовления скинкоута. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://igcsmarket.ru/upload/files/Dokument\\_679vera\\_smola\\_crystic\\_vinilefirnaya\\_5\\_kg\\_1617705899.pdf](https://igcsmarket.ru/upload/files/Dokument_679vera_smola_crystic_vinilefirnaya_5_kg_1617705899.pdf) (дата обращения: 18.05.2020).
11. Эпоксидная смола эд-20. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.lakma.info/ed-20/> (дата обращения: 25.04.2020).
12. ГОСТ 11262.Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М.: Стандартиформ, 2017. – 24 с.
13. ГОСТ 4651. Пластмассы. Метод испытания на сжатие. – М.: Стандартиформ, 2014. – 19 с.
14. ГОСТ 4648. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. – М.: Стандартиформ, 2014. – 34 с.
15. Патент па полезную модель 205 463 Российская Федерация, МПК В63В 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.
16. В. Harris, N. Gathercole, H. Reiter, T. Adam, Fatigue of carbon-fibre-reinforced plastics under block-loading adaptor/ conditions. Compos. Part A Appl. Sci. 28(4), 327–337 (1997).

### References

1. Cost and weight of composite ship structures: A parametric study based on Det Norske Veritas rules.
2. Tawfik B. Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials/B. Tawfik, H. Leheta, A. Elhewy, T. Elsayed// International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. Vol. 9. Is. 2. Pp. 185-198.
3. Kuteynikov M.A. Razrabotka novykh pravil po konstruktсии i prochnosti morskikh sudov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov/M.A. Kuteynikov, S.M. Kordonets, N.N. Fedonyuk//Nauchno-tehnicheskiiy sbornik rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. – 2017. – № 46-47. –s. 64-71.
4. Alsaaid.M. Issledovanie prochnostnykh kharakteristik polimernykh kompozitsionnykh materialov pri rastyazhenii /M. Alsaaid, A. Salamekh// Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2019. –№ 3 (45) Т.3. – с. 18-26.

5. Alsaid, M., Salamekh, A., Mamontov, V. A., & Azizova, G. U. (2020). Srovnitel'nyy analiz rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy mnogoslownogo polimernogo kompozitnogo materiala. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (63), 27-39. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.73>.
6. Anastasios P. Vassilopoulos. Fatigue of Fiber-reinforced Composites / Vassilopoulos. A.V, Keller.T// Engineering Materials and Processes. Springer, – 253 P.
7. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' XVI. Konstruktsiya i prochnost' korpusov sudov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov. –SPb: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2019, 151s.
8. E-Glass Emulsion Chopped Strand Mat. [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupa: <http://en.jushi.com/uploads/soft/jushiEN%20Products/EGlass%20Emulsion%20Chopped%20Strand%20MatE02.pdf> (data obrashcheniya: 11.02.2019).
9. Kharakteristiki smoly «Yarkopol-110». [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupa: [http://megaplast.org/images/pdf/Yarkopol\\_110.pdf](http://megaplast.org/images/pdf/Yarkopol_110.pdf) (data obrashcheniya: 11.02.2019).
10. Crystic VE 679 PA DCPD-Modifitsirovannaya vinil efirnaya smola dlya izgotovleniya skinkouta. [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupa: [https://igcmarket.ru/upload/files/Dokument\\_679vepa\\_smola\\_crystic\\_vinilefirnaya\\_5\\_kg\\_1617705899.pdf](https://igcmarket.ru/upload/files/Dokument_679vepa_smola_crystic_vinilefirnaya_5_kg_1617705899.pdf) (data obrashcheniya: 18.05.2020).
11. Epoksidnaya smola ed-20. [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupa: <http://www.lakma.info/ed-20/> (data obrashcheniya: 25.04.2020).
12. GOST 11262. Plastmassy. Metod ispytaniya na rastyazhenie. – M.: Standartinform, 2017. – 24 s.
13. GOST 4651. Plastmassy. Metod ispytaniya na szhatie. – M.: Standartinform, 2014. – 19 s.
14. GOST 4648. Plastmassy. Metod ispytaniya na staticheskiy izgib. – M.: Standartinform, 2014. – 34 s.
15. Patent na poleznuyu model' 205 463 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B63B 79/30 (2020.01) G01N 3/32 (2006.01). Ustanovka dlya ispytaniy soedineniy sudovykh korpusnykh konstruktsiy na tsiklicheskuyu dolgovechnost' / M. Alsaid, A. Salamekh, V.A. Chanchikov, V.A. Petrovskiy: zayavitel' i patentoobladatel' Alsaid Mazen, Salamekh Ali, – № 2020139513, zayav. 01.12.2020; opubl. 15.07.2021, Byul. № 20.
16. B. Harris, N. Gathercole, H. Reiter, T. Adam, Fatigue of carbon-fibre-reinforced plastics under block-loading adaptor/ conditions. Compos. Part A Appl. Sci. 28(4), 327–337 (1997).

#### 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 25.10.2021; одобрена после рецензирования 07.03.2022, принята к публикации 10.03.2022.

The article was submitted 25.10.2021; approved after reviewing 07.03.2022; accepted for publication 10.03.2022.

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

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.008>

### Регенеративный единый двигатель особого назначения для подводных лодок С.А. Базилевского

В.Н. Половинкин<sup>1</sup> vnpolo@yandex.ru, С.В. Федулов<sup>2</sup> serg.val.fed.661000@yandex.ru,

С.И. Титушкин<sup>1</sup> ritter0072011@mail.ru, Д.Н. Соловьев<sup>3</sup> botanik-s@yandex.ru

<sup>1</sup>Крыловский государственный научный центр, <sup>2</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

<sup>3</sup>Михайловская военная артиллерийская академия

**Аннотация.** В начале Первой мировой войны впервые в боевых действиях на море в массовом порядке начали применяться подводные лодки, которые показали свою эффективность. Однако уже к концу Первой мировой войны, вследствие развития средств противолодочной обороны, введения эскортного сопровождения морских транспортных конвоев специализированными противолодочными кораблями эффективность использования подводных лодок значительно снизилась. Со всей очевидностью возникла необходимость их модернизации, и, в первую очередь, совершенствования подводного хода, то есть создания единого двигателя. К реализации данной идеи приступил выдающийся инженер-кораблестроитель Сергей Александрович Базилевский. Созданный им регенеративный двигатель особого назначения для подводных лодок («РЕДО») обеспечивал ход подводной лодки как в надводном, так и в подводном положении. В статье раскрыта сама идея создания единого двигателя, освещены его конструктивные особенности, показан процесс создания «РЕДО» и принципиальная схема. Однако реализация идеи создания «РЕДО» ограничилась лишь опытными наработками. А именно, оснащением данным двигателем подводной лодки XII серии («М-92» / «Р-1»), которая накануне Великой Отечественной войны начала проходить испытания, но, к сожалению, так и не получила своего применения. С началом боевых действий все работы были прекращены.

**Ключевые слова:** подводная лодка, регенеративный единый двигатель особого назначения, жидкий кислород, лодочная энергетическая установка.

... **Для цитирования:** Половинкин В.Н., Федулов С.В., Титушкин С.И., Соловьев Д.Н. Регенеративный единый двигатель особого назначения для подводных лодок С.А. Базилевского, Морские интеллектуальные технологии 2022. Т. 1, Номер 1. С. 63—69

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.008>

### Regenerative Ensemble Submarine Engine of a Special Purpose Made by Sergei A. Bazilevsky

Valerij N. Polovinkin<sup>1</sup> vnpolo@yandex.ru, Sergey V. Fedulov<sup>2</sup> serg.val.fed.661000@yandex.ru,

Sergey I. Titushkin<sup>1</sup> ritter0072011@mail.ru, Dmitry N. Soloviev<sup>3</sup> botanik-s@yandex.ru

<sup>1</sup>Krylov State Research Centre, <sup>2</sup>Mozhaisky Military Space Academy, <sup>3</sup>Mikhailovskaya Military Artillery Academy, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** At the beginning of the First World War, the use of submarines became very popular by military officers in marine military operations, as the use of submarines proved their efficiency. However, by the end of the First World War, due to the development of anti-submarine defense facilities, the introduction of escort of sea transport convoys by specialized anti-submarine ships, the effectiveness of submarines use decreased significantly. Obviously, there occurred a necessity to modernize them, and, firstly, to improve the underwater course, that is, to create a single engine. The outstanding shipbuilding engineer Sergei A. Bazilevsky began to implement this idea. The designed regenerative engine of a special purpose for submarines ensured the progress of a submarine both, on the surface, and in the submerged position.

The paper reveals the very idea of creating the ensemble engine, highlights its design features, and shows the process of regenerative engine of a special purpose creation as well as its schematic diagram. However, the implementation of the regenerative engine of a special purpose idea creation was limited only to experimental developments. Namely, equipping of the submarine of the XII series («M-92» / «R-1») with this engine, which began to be tested just before the Great Patriotic War, but, unfortunately, did not receive its application. With the outbreak of combat operations, all the R&D work was stopped.

**Keywords:** submarine, regenerative ensemble engine of a special purpose, liquid oxygen, boat power plant.

**For citation:** Valerij N. Polovinkin, Sergey V. Fedulov, Sergey I. Titushkin, Dmitry N. Soloviev Regenerative Ensemble Submarine Engine of a Special Purpose Made by Sergei A. Bazilevsky, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 63—69



## Введение

Успех немецких подводных лодок в начале Первой мировой войны был несомненным. В 1914–1917 годах каждая из них, находясь в море, топила в среднем за месяц свыше 16000 т. военных кораблей и торговых судов противника. А к концу войны эта цифра упала до 6000 т, в 21/2 раза.

После Первой мировой войны была потрачена масса усилий, чтобы вернуть лодкам их былой престиж, но одновременно совершенствовались и средства борьбы с ними. В 1939–42 годы на каждую немецкую подводную лодку, находящуюся в море, приходилось в среднем лишь по 7.250 т. потопленных кораблей и судов в месяц. Результаты всех усилий практически скомпенсировались. К концу же Второй мировой войны эта цифра упала до 600 т. в месяц. Многие из лодок погибли, не успев даже выйти в атаку.

Кривая эффективности неуклонно стремилась к нулю. Становилось ясным, что гибнет самая идея подводной войны, что нужны радикальные меры для повышения боеспособности лодок. Но лишь немногие поняли раньше конца Второй мировой войны, что главный источник их слабости лежит в механизмах подводного хода, в недостатках их мощности и особенно запаса энергии для плавания под водой [1].

### 1. Идея создания единого двигателя для подводных лодок

Первым советским конструктором, который поднял вопрос о разрешении проблемы превращения подводной лодки из ныряющего в подводный корабль, был военный инженер-подводник М.А. Рудницкий, выступивший в 1928 году по этому поводу в печати (журнал «Морской Сборник»).

Через пять лет, в 1933 году, другой советский инженер А.П. Пугач безуспешно пытался практически разрешить ту же проблему, обеспечив работу обычного дизеля взрывного типа на смеси водорода с кислородом, вместо бензина и воздуха, но эта схема себя не оправдала по весам и габаритам необходимых запасов топлива и окислителя.

Впервые серьезные, научно обоснованные шаги в направлении практического разрешения проблемы превращения подводной лодки в подлинный подводный корабль предпринял в 1935 году инженер-кораблестроитель С.А. Базилевский. Он выдвинул оригинальную и многообещающую идею создания для подводной лодки единого двигателя совершенно нового типа и теоретически обосновал возможность создания «Регенеративного двигателя особого назначения» или сокращенно – «РЕДО» [2].



Рис. 1. С.А. Базилевский

Основной идеей данного двигателя являлось то, что в установке «РЕДО» дизель в надводном положении подводной лодки работает на атмосферном воздухе, а в подводном – по замкнутому циклу, в котором выхлопной газ дизеля проходит через газоохладитель, где происходит его охлаждение и отделение конденсата и механических примесей, после чего к газу добавляется чистый кислород, и смесь поступает на всасывание дизеля. При этом излишки газа удаляются из системы вместе с находящимся в газах азотом. Азот постепенно заменяется на углекислый газ. Особенностью проекта С.А. Базилевского являлось еще и в то, что в отличие от ранее выдвигаемых аналогичных предложений хранение кислорода осуществлялось в жидком состоянии [3].

С.А. Базилевский отмечал, что водородно-кислородный двигатель привлекал к себе внимание изобретателей еще в прошлом столетии (Ошер Висс). Казалось, чего проще: сжигать газы, производство которых давно налажено, и получать водяной пар, легко конденсирующийся в морской воде. Такой двигатель не нуждается ни в тяжелой аккумуляторной батарее, вес которой на 1 л.с., соизмерим только с весом человека и животных, ни в атмосферном воздухе, ни в сложных устройствах для удаления продуктов сгорания.

Правда, скорость сгорания гремучей смеси значительно превышает таковую у смеси воздуха с парами бензина. Поэтому двигатель трещит как пулемет. Но с этим, вероятно, еще можно справиться. Хуже другое: водород – самый легкий газ. Даже в жидком состоянии он в 14 раз легче воды. А сохраняет такое состояние он только при температурах ниже – 241°С (критическая точка). Для хранения его нужны цистерны из специального холодоустойчивого материала, со специальной тепловой изоляцией толщиной не менее 400–500 мм. Все это настолько громоздко, что никаких преимуществ от замены электромотора и батареи аккумуляторов тепловым двигателем не остается.

Если в качестве горючего на подводном ходу применять обычное топливо, вторым компонентом будет кислород. А что, если действительно попробовать хранить его в жидком виде? Критическая точка у кислорода лежит много выше, чем у водорода. Толщина изоляции требуется меньшая, а по удельному весу он даже тяжелее воды. Принципиально возможно и восстановление его запаса средствами лодки, в море, из атмосферы. Наподобие зарядки аккумуляторов. Сложнее - с продуктами сгорания: водяной пар легко конденсируется, и углекислота растворяется в морской воде [4].

Таким образом, при нахождении подводной лодки в подводном положении сжигание топлива в двигателе осуществлялось не в атмосферном воздухе, а в постоянно регенерируемой газовой смеси, в которой азот был бы заменен углекислотой, позаимствованной из газовыхлопа, С.А. Базилевский разработал схему регенерации газов применительно к высоконапорному парогенератору, питающему главную лодочную паротурбинную установку. Схема предусматривала возможность быстрого переключения данной установки на работу в подводном положении с открытого цикла со всасыванием воздуха из атмосферы и выбросом продуктов сгорания за борт, на замкнутый цикл с регенерацией части выхлопных газов и использованием их углекислоты.

Для бесследного удаления отработавшей углекислоты было предусмотрено два способа: на малой глубине – сжижение, на большой – выпуск за борт в воду. Необходимый для создания газовой смеси запас кислорода, предусматривалось хранить на лодке в жидком состоянии, а добывать его в надводном положении из атмосферного воздуха.

Конструктор решил в своей схеме использовать жидкий кислород, а не перекись водорода, которую позднее пытались применить немцы. Он исходил из того, что жидкий кислород менее взрыво- и пожароопасен, и, вдобавок, дешевле, а расход его на единицу мощности вдвое меньший. Кроме того, С.А. Базилевский учитывал, что возобновить в море запас перекиси водорода практически невозможно, ее же отсутствие вынудило бы иметь на лодке отдельный двигатель для обеспечения надводного хода.

Схема установки «РЕДО» предусматривала наличие на подводной лодке кислородной станции малых размеров и приемлемой производительности.

Для хранения жидкого кислорода были построены специальные латунные цистерны, а для откачки части выхлопных газов на сжижение или выпуск за борт поставлен компрессор, приводимый в движение главным двигателем.

## **2. Создание Регенеративного единого двигателя особого назначения «РЕДО»**

Первая модельная установка с 4-х цилиндровым маломощным дизелем была собрана на Балтийском заводе [5]. Испытания малой стендовой установки, носившие чисто качественный характер, привлекли к себе внимание многих, допущенных к ним специалистов и, в первую очередь, из Военно-Морского Флота, Наркомата судостроительной промышленности (НКСП) и научно-

исследовательских институтов. С Коломенского завода приехал главный инженер В.А. Малышев (впоследствии Нарком тяжелого машиностроения). Он долго не хотел верить, что дизель может работать без доступа воздуха, на такой «неподходящей» газовой смеси, но после самой тщательной проверки вынужден был в этом убедиться.

Под конец испытаний приехал первый секретарь Ленинградского Обкома ВКР(б) А.А. Жданов, изучивший установку не менее внимательно, чем В.А. Малышев. Затем вопрос был доложен Народному Комиссару тяжелой промышленности Г.К. Орджоникидзе. Решение последовало немедленно: «Если автор уверен в правильности своей идеи, - поручить ему постройку опытной подводной лодки с двигателем его системы» [6].

Таким образом, Г.К. Орджоникидзе, в ведении которого тогда находилось судостроение, сумел оценить перспективность предложенной С.А. Базилевским схемы и ее значение для развития советского подводного кораблестроения. По его указанию в Ленинграде на заводе «Судомех» была заложена опытная подводная лодка с энергетической установкой типа «РЕДО». Эту лодку было решено для ускорения создавать на базе переоборудования одной из подводных лодок XII серии (М-92). Все проектные работы, как по созданию конструкции лодочной установки типа «РЕДО», так и по переоборудованию, выделенной подводной лодки XII серии, были сосредоточены в ЦКБС-2. Главным конструктором проекта «РЕДО» назначили автора идеи С.А. Базилевского, в помощь которому были выделены конструкторы Я.Ф. Мансуров, Н.В. Анучин, В.В. Пересыпкин, Н.Ф. Полотнов и другие. Заказ на создание опытной подводной лодки «РЕДО», которой был присвоен бортовой литер «Р-1», был выдан заводу «Судомех». Строителем подводной лодки «Р-1» назначили опытного и энергичного инженера-кораблестроителя А.А. Пономарева. Командиром БЧ-V подводной лодки был назначен инженер-механик Р.Ю. Гинтовт [7].

К весне 1937 года все основные узлы лодочной энергетической установки были изготовлены и прошли стендовые испытания. В 1938 году постройка корпуса лодки и монтаж всего оборудования уже непосредственно у нее на борту был завершен.

Как и все подводные лодки XII серии, «Р-1» имела шесть водонепроницаемых отсеков, из которых наибольшему переоборудованию подверглась их кормовая группа. Вместо дизель-электрической энергетической установки с аккумуляторной батареей, на подводной лодке «Р-1» была оборудована одновальная установка с 8-ми цилиндровым мощным двигателем, снабженным специальным распределением и уплотнениями. Для обеспечения судовых потребностей в электроэнергии имелась небольшая динамо-машина, использовавшая для своей работы часть мощности главных механизмов. Вместо аккумуляторных батарей во II и IV отсеках лодки были предусмотрены кислородные цистерны, рассчитанные на одни сутки непрерывного полного хода.

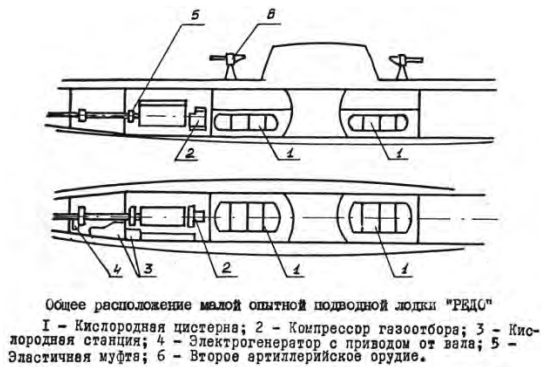


Рис.2. Общее расположение малой опытной подводной лодки «РЕДО»

Малогабаритное оборудование для получения в море жидкого кислорода было изготовлено Московским автогенным заводом и смонтировано в кормовом отсеке лодки. Приводной электродвигатель был снабжен автоматической системой управления и буферной батареей аккумуляторов стартерного типа для питания, освещения и самых необходимых вспомогательных механизмов на стоянке лодки [8].

Главный двигатель - дизель 38 КРНС-8 был частично переделан с установкой предохранительных мембран на картере и газоотводе, а также установкой газоохладителя, совмещенного с глушителем, кроме того, во всасывающем коллекторе была смонтирована электрогрелка.

Отбор избытка отработанных газов осуществлялся компрессором производительностью 16 л/мин при давлении 225 кг/см<sup>2</sup>, приводимым от коленчатого вала дизеля. Для исключения появления пузырькового следа от выхлопных газов предусматривалось сжигать газ под давлением в 60-100 кг/см<sup>2</sup> и хранить в баллонах высокого давления. Углекислотная батарея состояла из 78 стальных баллонов емкостью по 68 л, размещенных вне прочного корпуса вдоль киля. Периодически при нахождении лодки на перископной глубине углекислота из баллонов отводилась за борт.

Для уменьшения шумности подводной лодки дизель был установлен на плавающую раму на четырех лапах с резиновыми гофрированными амортизаторами. Аналогичным образом были закреплены и вспомогательные агрегаты, обеспечивающие его работу. Р-1 стала первой лодкой с полностью амортизированной энергоустановкой, что привело к значительному снижению шумности.

Цистерны для хранения жидкого кислорода емкостью по 4000 кг размещались в трюмах 2-го и 4-го отсеков вместо аккумуляторной батареи. Они были изготовлены из латуни ЛС-59, установлены на дубовые подушки и теплоизолированы шлаковой ватой. Гребной электродвигатель и стандартная лодочная аккумуляторная батарея на подводной лодке Р-1 отсутствовали [9].

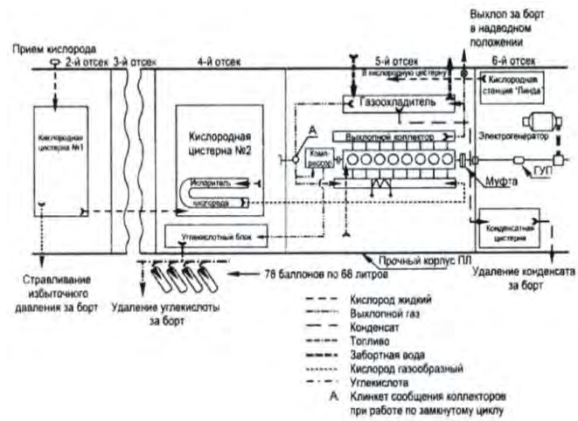


Рис.3. Принципиальная схема энергетической установки «РЕДО» на ПЛ «Р-1»

Еще до окончания 1938 года были начаты первые экспериментальные работы и испытания, в ходе которых осуществлялся поиск новых конструктивных и технологических решений для усовершенствования и отладки всей уникальной системы, которые почти непрерывно продолжались вплоть до начала Великой Отечественной войны.



Рис.4. Подводные лодки «М-401» и «Р-1» у причала завода № 196

В результате длительных швартовых испытаний, нескольких выходов подводной лодки «Р-1» в море, а также одного пробного погружения, подтвердилась перспективность схемы «РЕДО». Удалось добиться того, что переход с надводного режима на подводный стал простым и быстрым. Он занимал не более 6-7 секунд и позволял очень просто выполнять маневр «погружение на ходу», не теряя скорости, что на дизель-электрических лодках было связано со значительными трудностями. Так же быстро осуществлялся обратный переход к надводному режиму, остановка, реверс и даже пуск теплового двигателя «по подводному», после 1-2 часовой стоянки [10].

Успехи отечественных ученых-кораблестроителей в области создания единого двигателя для подводных лодок по достоинству оценили руководство страны и приняло меры по созданию необходимых условий для их успешной работы. Так 3 марта 1939 года вышло Постановление

Комитета обороны при Совете Народных Комиссаров СССР «О проектировании и постройке единых двигателей для подводных лодок» [11]. В соответствии с данным Постановлением в целях повышения эффективности работ по созданию единых двигателей для подводных лодок, во-первых, Наркомату судостроительной промышленности (НКСП) поручалось в течении месяца объединить в НИИ-45 работу всех советских специалистов в данной области, а именно: Базилевского («РЕДО»), Златопольского («НИВК-ИВР»), Кривова и Станкевича, ЦКТИ («ЦКТИ-28»). Оказывать им всевозможную помощь в решении возникающих вопросов при проведении изыскательских, научно-исследовательских и технических работ.

Во-вторых, НКСП предписывалось создать все условия для проведения экспериментальных и производственных работ вышеперечисленным конструкторам на базах завода №196 и НИИ045.

В-третьих, в целях обеспечения завода №196 всем необходимым для работ по единому двигателю для подводных лодок оборудованием и материалами привлекались мощности целого ряда наркоматов, например, топливной промышленности, тяжелого машиностроения, среднего машиностроения, общего машиностроения, электростанций и электропромышленности, вооружения, обороны.

В-четвертых, финансовое обеспечение работ по созданию единого двигателя для подводных лодок возлагалось на Народный комиссариат Военно-морского флота (НК ВМФ) по согласованию с НКСП.

Этим же Постановлением устанавливались сроки завершения работ по единым двигателям для подводных лодок, а именно: по двигателю «РЕДО» до 1 июля 1939 года подготовить лодку для сдаточных испытаний; по двигателю «НИВК-ИВР» – до 1 января 1940 года закончить стендовые испытания; по двигателю «ЦКТИ-282» – до 1 мая 1940 года закончить технический проект. По установке Кривова и Станкевича отменялось решение Совета Труда и Обороны об оборудовании подводной лодки данной установкой.

А также для оказания помощи конструкторам единых двигателей предписывалось привлекать в качестве консультантов академиков соответствующих специальностей, а для решения отдельных научно-исследовательских вопросов, стоящих перед НКСП в ходе работ по созданию единых двигателей использовать возможности Академии наук СССР.

Вместе с тем НКСП обязывалось назначить должностных лиц, ответственных за ход выполнения работ по созданию единых двигателей для подводных лодок [12].

К началу Великой Отечественной войны возможности опытной подводной лодки «Р-1», как лаборатории для усовершенствования, еще не были до конца исчерпаны, но доработка установки и продолжение испытаний требовали ее серьезной реконструкции. Для повышения обитаемости нужна была лучшая герметизация двигателя или, в крайнем случае, герметизация того отсека, в котором этот двигатель был установлен. В последнем случае необходимо было бы предусмотреть устройство для дистанционного управления и обслуживания.

Для повышения живучести и надежности требовалось защитить корпус лодки от коррозии там,

где в районе кормового отсека расположена сточная цистерна для конденсата. Некоторые другие усовершенствования также были необходимы. На все эти работы в мирных условиях потребовалось бы еще около года, вовремя же войны заниматься подобными делами не было возможности и подводную лодку «Р-1» пришлось законсервировать [13].

Однако история с двигателем «РЕДО» с началом войны не закончилась. В 1946 году при обследовании завода фирмы «Юнкерс» в Дессау, производившего не только самолеты, но и вооружение для них, была обнаружена схема теплового двигателя для дальнеходной торпеды, почти точно копирующая схему «РЕДО» без сжижения углекислоты. В цехах завода были найдены детали этого двигателя и стенд для испытания его на торпедах. При разборе архивов Высшего военно-морского командования Германии была найдена вторая такая же схема, но уже предназначенная для подводной лодки. Из опроса немецких специалистов выяснилось, что по этой схеме инженером Шеффлером была смонтирована стендовая установка, прошедшая в конце войны серию испытаний. В объяснительной записке указывалось на желательность хранения кислорода в жидком виде, но выражались большие сомнения в реальности этой мысли [14].

Как свидетельствуют факты, данное изобретение советского конструктора С.А. Базилевского не обошла вниманием германская военно-морская разведка, так как схема «РЕДО», найденная в архивах Высшего военно-морского командования Германии была получена явно агентурным путем из СССР. Год спустя, в 1947 году советские следственные органы обнаружили факт исчезновения еще до войны одного экземпляра подлинной схемы «РЕДО» из секретариата 1-го заместителя наркома тяжелой промышленности (1934–1936) Г.Л. Пятакова (осужденного в январе 1937 года) [15].

### Заключение

В послевоенное время первоначально внимание советских судостроителей было отвлечено в сторону попыток использовать на подводных лодках схему трофейной энергетической установки Вальтера, работающей по замкнутому циклу с использованием в качестве горючего перекиси водорода. Появившиеся вскоре после этого атомные энергетические установки вовсе сняли с повестки дня всю проблему использования «единого двигателя» для подводных лодок.

По итогам рассмотрения истории создания советскими судостроителями в довоенные годы опытной подводной лодки «Р-1», необходимо сделать следующие выводы:

- возникновение идеи и первое практическое осуществление схемы «РЕДО» на подводной лодке, явилось важным вкладом советских судостроителей в отечественное и мировое подводное кораблестроение на пути разрешения вековой проблемы длительного автономного подводного плавания;

- освоение в послевоенном подводном кораблестроении ядерных энергетических установок, сняло с повестки дня вопрос о необходимости оснащения океанских боевых подводных лодок

установками, работающими по замкнутому циклу, в том числе и по схеме «РЕДО».

Вместе с тем, заслуживает внимания относительная малогабаритность установки типа «РЕДО», а также отсутствие тяжелой конструкции биологической защиты для обеспечения

использования установки на подводной лодке. Эти обстоятельства не исключают в будущем использования усовершенствованных установок «РЕДО» на некоторых небольших автономных подводных судах [16].

#### Литература

1. Базилевский С.А. Из моих воспоминаний. Рукопись. СПб.: ФГУП. «Крыловский государственный научный центр». – 1970. – С. 4-5.
2. Быховский И.А. Развитие советского подводного кораблестроения. НИР. СПб.: ЦНИИ им. А.Н. Крылова. – 1976. –С. 128.
3. Мышинский Э.Л. Подводные лодки с анаэробными энергетическими установками. СПб.: ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 2006. – С. 33.
4. Базилевский С.А. Из моих воспоминаний. Рукопись. СПб.: ФГУП. «Крыловский государственный научный центр». – 1970. – С. 6-7.
5. Быховский И.А. Развитие советского подводного кораблестроения. Рукопись. СПб.: ЦНИИ им. А.Н. Крылова. – 1976. –С. 130.
6. Быховский И.А. Развитие советского подводного кораблестроения. Рукопись. СПб.: ЦНИИ им. А.Н. Крылова. – 1976. – С. 132.
7. Быховский И.А. Развитие советского подводного кораблестроения. Рукопись. СПб.: ЦНИИ им. А.Н. Крылова. – 1976. – С. 133.
8. Быховский И.А. Развитие советского подводного кораблестроения. Рукопись. СПб.: ЦНИИ им. А.Н. Крылова. – 1976. – С. 133.
9. Мышинский Э.Л. Подводные лодки с анаэробными энергетическими установками. СПб.: ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 2006. – С. 35.
10. Быховский И.А. Развитие советского подводного кораблестроения. Рукопись. СПб.: ЦНИИ им. А.Н. Крылова. – 1976. – С. 134.
11. Оборонно-промышленный комплекс СССР накануне Великой Отечественной Войны (1938—июнь 1941). М.: Книжный Клуб Книговек, 2015. – С. 294-295.
12. Оборонно-промышленный комплекс СССР накануне Великой Отечественной Войны (1938—июнь 1941). М.: Книжный Клуб Книговек, 2015. – С. 294-295.
13. Быховский И.А. Развитие советского подводного кораблестроения. Рукопись. СПб.: ЦНИИ им. А.Н. Крылова. – 1976. – С. 134.
14. Федулов С.В., Барбанель Б.А. Деятельность Технического бюро Наркомата судостроительной (министерства) промышленности в Германии (1945–1947). // Военно-исторический журнал. №3. - 2019. – С. 47.
15. Федулов С.В., Барбанель Б.А. Деятельность Технического бюро Наркомата судостроительной (министерства) промышленности в Германии (1945–1947). // Военно-исторический журнал. №3. - 2019. – С. 47.
16. Быховский И.А. Развитие советского подводного кораблестроения. Рукопись. СПб.: ЦНИИ им. А.Н. Крылова. – 1976. – С. 134.

#### References

1. Bazilevsky Sergei A. Iz moih vospominanij. Rukopis' [From my memories. Manuscript]. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1970. Pp. 4-5.
2. Bykhovsky I.A. Razvitie sovetskogo podvodnogo korablestroeniya. [The development of Soviet submarine shipbuilding]. Research work. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1976. P. 128.
3. Myshinsky E.L. Podvodnye lodki s anaerobnymi energeticheskimi ustanovkami. [Submarines with anaerobic power plants]. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 2006. P. 33.
4. Bazilevsky Sergei A. Iz moih vospominanij. Rukopis' [From my memories. Manuscript]. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1970. Pp. 6-7.
5. Bykhovsky I.A. Razvitie sovetskogo podvodnogo korablestroeniya. [The development of Soviet submarine shipbuilding]. Manuscript. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1976. P. 130.
6. Bykhovsky I.A. Razvitie sovetskogo podvodnogo korablestroeniya. [The development of Soviet submarine shipbuilding]. Manuscript. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1976. P. 132.
7. Bykhovsky I.A. Razvitie sovetskogo podvodnogo korablestroeniya. [The development of Soviet submarine shipbuilding]. Manuscript. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1976. P. 133.
8. Bykhovsky I.A. Razvitie sovetskogo podvodnogo korablestroeniya. [The development of Soviet submarine shipbuilding]. Manuscript. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1976. P. 133.
9. Myshinsky E.L. Podvodnye lodki s anaerobnymi energeticheskimi ustanovkami. [Submarines with anaerobic power plants]. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 2006. P. 35.
10. Bykhovsky I.A. Razvitie sovetskogo podvodnogo korablestroeniya. [The development of Soviet submarine shipbuilding]. Manuscript. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1976. P. 134.
11. Oboronno-promyshlennyj kompleks SSSR nakanune Velikoj Otechestvennoj Vojny (1938—iyun' 1941) [The defense industrial complex of the USSR on the eve of the Great Patriotic War (1938-June 1941)]. Moscow, Book club Knigovok. 2015. Pp. 294-295.

12. Oboronno-promyshlennyj kompleks SSSR nakanune Velikoj Otechestvennoj Vojny (1938—iyun' 1941) [The defense industrial complex of the USSR on the eve of the Great Patriotic War (1938-June 1941)]. Moscow, Book club Knigovek. 2015. Pp. 294-295.
13. Bykhovsky I.A. Razvitiye sovetskogo podvodnogo korablestroeniya. [The development of Soviet submarine shipbuilding]. Manuscript. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1976. P. 134.
14. Fedulov S.V., Barbanel' B.A. Deyatel'nost' Tekhnicheskogo byuro Narkomata sudostroitel'noj (ministerstva) promyshlennosti v Germanii (1945–1947). [Activities of the Technical Bureau of the People's Commissariat of the Shipbuilding (Ministry) Industry in Germany (1945–1947)]. Military history journal No 3. 2019. P. 47.
15. Fedulov S.V., Barbanel' B.A. Deyatel'nost' Tekhnicheskogo byuro Narkomata sudostroitel'noj (ministerstva) promyshlennosti v Germanii (1945–1947). [Activities of the Technical Bureau of the People's Commissariat of the Shipbuilding (Ministry) Industry in Germany (1945–1947)]. Military history journal No 3. 2019. P. 47.
16. Bykhovsky I.A. Razvitiye sovetskogo podvodnogo korablestroeniya. [The development of Soviet submarine shipbuilding]. Manuscript. Saint Petersburg. Krylov State Research Centre. 1976. P. 134.

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

**Валерий Николаевич Половинкин**, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр», заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшей школы, действительный член ПАНИ, действительный член РАИН, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44; e-mail: vnpolo@yandex.ru

**Valerij N. Polovinkin**, Dr. Sci. (Eng)s, Professor, Scientific director Krylov State Research Centre, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Education, full member of PANI, full member of RAIN, Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, 196158, Russian Federation, e-mail: vnpolo@yandex.ru

**Сергей Валентинович Федулов**, доктор исторических наук, доцент, профессор кафедры военно-политической работы в войсках (силах) Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, член-корреспондент АВН, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская д.13, e-mail: serg.val.fed.661000@yandex.ru

**Sergey V. Fedulov**, Dr. Sci. (Historical), Professor of the Department of Military-Political Affairs in the Troops (Forces) Mozhaisky Military Space Academy, corresponding member of AVN, Zhdanovskaya street, 13, St. Petersburg, 197198, Russian Federation, e-mail: serg.val.fed.661000@yandex.ru

**Сергей Иванович Титушкин**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник – руководитель группы истории ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: ritter0072011@mail.ru

**Sergey I. Titushkin**, PhD (Eng), senior researcher - history team leader, Krylov State Research Centre, Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, 196158, Russian Federation, e-mail: ritter0072011@mail.ru

**Дмитрий Николаевич Соловьев**, доктор исторических наук, доцент, доцент кафедры военно-политической работы в войсках (силах) Михайловская военная артиллерийская академия, 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, д. 22, e-mail: botanik-s@yandex.ru

**Dmitry N. Soloviev**, Dr. Sci. (Historical), Assistant professor of the Department of Military-Political Affairs in the Troops (Forces) Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Komsomol street, 22, St. Petersburg, 195009, Russian Federation, e-mail: botanik-s@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 21.02.2022.

Научная статья

УДК 621.43.013:629.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.009>

## Автоматизированный выбор оптимального режима сепарирования моторного масла при его комбинированной очистке в судовых дизелях

М.С. Молоков<sup>1</sup> [nikolaimolokov2014@mail.ru](mailto:nikolaimolokov2014@mail.ru), С.П. Бойко<sup>1</sup> [boykoland@mail.ru](mailto:boykoland@mail.ru), П.П. Кича<sup>2</sup> [pkicha@inbox.ru](mailto:pkicha@inbox.ru)

<sup>1</sup>Морской государственный университет имени адм. Г.И. Невельского, <sup>2</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

**Аннотация.** Доказана необходимость управления пропускной способностью центробежного сепаратора, подключаемого байпасно к системе смазки автоматизированного судового дизеля, в совместной работе с полнопоточным саморегенерирующимся фильтром тонкой очистки моторного масла. Выявлено наличие пропускной способности сепаратора в комбинированной совместно с фильтром очистке смазочного масла в двигателе внутреннего сгорания, обеспечивающей самое низкое накопление нерастворимых примесей в смазочном масле. Сообщается, что оптимальная пропускная способность центробежного сепаратора обусловлена его «очистительной мощностью», задаваемой через фактор разделения и поверхность осаждения загрязнений на тарелках индексом производительности или номинальными тонкостью отсева и пропускной способностью, зависит от дисперсного состава загрязнений, вместимости смазочной системы и других факторов. Приводится расчетно- экспериментальная модель комплекса «дизель – сепаратор – масло – фильтр» по выбору оптимальной пропускной способности сепаратора, которая в зависимости от состава и характеристик звеньев находится в диапазоне 20–60 % его паспортной (номинальной) производительности. Предлагается для повышения эффективности функционирования комбинированной системы тонкой очистки смазочного масла, включающий сепаратор и саморегенерирующийся фильтр с периодической противоточной регенерацией фильтрующих элементов, использовать самонастраивающийся поисковый регулятор. Адаптивность его работы при задании оптимальной пропускной способности сепаратора достигается реагированием на входной сигнал от частоты регенераций самоочищающегося фильтра, которая зависит от количественного и качественного состава загрязнений моторного масла. Использование адаптивного регулятора обеспечивает глубокую очистку смазочного масла сепарированием от мелкодисперсных нерастворимых примесей (продуктов срабатывания присадок, изнашивания дизеля и неполного сгорания топлива), что способствует торможению его старения, увеличивает автономность работы и функциональную способность саморегенерирующегося фильтра в повышении надежности защиты подшипников двигателя от абразивного изнашивания. Сообщается, что частотой саморегенераций фильтр реагирует на состояние дисперсной фазы загрязнений и корректирует систему на режим очистки, обеспечивающий минимальный уровень накопления в масле нерастворимых примесей и высокую их дисперсность. Показана эффективность комбинированной системы очистки моторного масла с адаптивным реагированием на внешние возмущения, способствующая реализации ресурсосберегающего маслоиспользования в судовых автоматизированных дизелях.

**Ключевые слова:** ресурсосберегающее маслоиспользование, очистка моторного масла, сепарирование масла, саморегенерирующийся фильтр, оптимальный режим очистки, адаптивное управление.

**Для цитирования:** Молоков М.С., Бойко С.П., Кича П.П. Автоматизированный выбор оптимального режима сепарирования моторного масла при его комбинированной очистке в судовых дизелях Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 70—79

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.009>

## Automated selection of the optimal mode of separation of engine oil during its combined cleaning in marine diesel engines

Nikolai S. Molokov<sup>1</sup> [nikolaimolokov2014@mail.ru](mailto:nikolaimolokov2014@mail.ru), Sergei P. Boiko<sup>1</sup> [boykoland@mail.ru](mailto:boykoland@mail.ru),

Pavel P. Kicha<sup>2</sup> [pkicha@inbox.ru](mailto:pkicha@inbox.ru)

<sup>1</sup>Maritime state university named after Gennagy Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation, <sup>2</sup>Far eastern state technical fisheries university, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** The necessity of a centrifugal purifier capacity control when purifier is running together with a full-flow self-regenerating fine filter in marine diesel engine lubrication system is explained. The presence of the optimum capacity of the purifier is revealed. The optimum capacity provides the lowest accumulation of insoluble impurities in lubricating oil. It is proved that the optimal capacity of a centrifugal purifier depends on its “cleaning power”, which is set through the purifier performance index. It depends on the separation factor and the surface of contaminants sedimentation on the discs. An experimental model of the “diesel – purifier – oil – filter” system is presented. It’s designed to choose the purifier optimal capacity. The capacity is led in the range of 20 – 60% of its nominal performance. It is proposed to use a self-adjusting search regulator to improve the efficiency of the combined system for lubricating oil fine purification,

including a purifier and a self-regenerating filter with periodic countercurrent regeneration of filter elements. The adaptability of its operation when setting the separator optimum purification capacity is achieved by responding to the input signal from the frequency of regenerations of the self-cleaning filter, which depends on the quantitative and qualitative composition of engine oil contaminants. The use of an adaptive regulator provides deep purification of lubricating oil by removing insoluble impurities (products of additive action, diesel wear and incomplete combustion of fuel) It helps to slow down its aging, increase the autonomy of system operation and increase reliability of protecting engine bearings from abrasive wear. It is represented that the self – regenerating filter responds to the state of the dispersed phase of contaminants and corrects the system for the optimum purification mode, providing a minimum level of accumulation of insoluble impurities in the oil. It is shown that the combined engine oil cleaning system with adaptive response to external disturbances is highly effective and ensures the implementation of resource-saving oil use in marine automated diesel engines.

**Keywords:** resource-saving oil use, engine oil cleaning, oil separation, self-regenerating filter, optimal cleaning mode, adaptive control

**For citation:** Nikolai S. Molokov, Sergey P. Boik, Pavel P. Kicha Automated selection of the optimal mode of separation of engine oil during its combined cleaning in marine diesel engines Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 70—79

### Введение

В последние годы ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых тронковых дизелях, особенно эксплуатирующихся на низкосортных высоковязких топливах, получило широкое развитие [1]. Эта технология эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является эффективной мерой повышения их надежной работы. При этом достигается низкий, в пределах 1,2–2 г/(кВт·ч), удельный за слив и угар расход смазочного (моторного) масла (ММ) и высокие, до 15–20 тыс. ч, сроки работы между моточистками (переборками с вскрытием цилиндров) [2, 3].

Высокий, не менее 3 тыс. ч, срок службы ММ, минимальное изнашивание и нагарообразование деталей цилиндрико-поршневой группы достигаются применением термостойких смазочных масел с многофункциональными присадками последнего поколения [3, 4]. Серьезным подспорьем в повышении долговечности ДВС является качественная очистка ММ [5, 6]. В судовых автоматизированных тронковых дизелях она осуществляется саморегенерирующимся фильтром (СРФ) тонкой очистки на полном потоке и байпасно подключаемом в системе смазки (СС) центробежным сепаратором (ЦС). При этом в большинстве случаев используется самоочищающийся ЦС, который не требует постоянного обслуживания.

Режимы работы агрегатов комбинированного маслоочистительного комплекса, включающего СРФ и ЦС, специфичны [5]. Первый из них, имея номинальную тонкость отсева 30–50 мкм, надежно защищает подшипники ДВС от абразивного изнашивания. Второй агрегат очистки при номинальной тонкости отсева 4–6 мкм эффективно удаляет из масла мелкодисперсные нерастворимые продукты срабатывания присадок, износа и внешнего загрязнения двигателя, которые интенсифицируют старение ММ. Взаимодействие этих маслоочистителей (МО) приводит к такому качественному и количественному состоянию дисперсной фазы нерастворимых продуктов (механических примесей) в смазочном масле, когда изнашивание и нагарообразование в ДВС находится на минимальном уровне, а СРФ может длительно, в течение 3–5 тыс. ч, функционировать без обслуживания.

Очистительная и пропускная способность (индекс производительности) ЦС выбирается из условий

достижения минимального изнашивания дизеля и накопления нерастворимых продуктов (НРП) в масле на уровне обеспечения надежной и эффективной работы СРФ и СС в целом [3, 4]. Подбор пропускной способности ЦС осуществляется с учетом скорости поступления и дисперсного состава загрязнителя ММ. Она также зависит от разделительной способности сепаратора, задаваемой частотой вращения ротора и поверхностью тарелок, на которые осаждается загрязнитель. Эти параметры формируются с учетом типа, мощности, уровня форсировки и технического состояния двигателя, качества применяемых топлив и масел [7, 8].

Действующие рекомендации указывают на необходимость при очистке ММ с присадками задавать пропускную способность ЦС меньше номинальной, определяемую паспортной характеристикой. При этом, чем выше диспергирующая способность присадок, тем меньше должна быть варьируемая пропускная способность сепаратора. Обводненные ММ очищают на пропускной способности ЦС, близкой к паспортной [5].

Сжигание в тронковых дизелях высоковязких топлив, получаемых при каталитическом крекинге, сопровождается поступлением в СС алюмосиликатов. Это весьма абразивные НРП, они попадают в топливо при переработке нефти из-за недостаточно полного их удаления циклонированием [1]. Попадание их в СС значительно искажает типовой дисперсный состав нерастворимых загрязнений масла и увеличивает очистительную нагрузку на МО, приводит к необходимости так регулировать пропускную способность ЦС, чтобы эффективность комбинированной системы тонкой очистки масла (КСТОМ) была максимальной. Рекомендации по выбору оптимальной пропускной способности ЦС в совместной работе с СРФ отсутствуют [9, 10]. Необходима разработка системы управления работой сепаратора в КСТОМ для того, чтобы возможности и преимущества очистки ММ фильтрованием и сепарированием были реализованы наиболее полно.

### Оптимальные режимы сепарирования циркуляционных масел судовых дизелей

Циркулируя в СС работающего двигателя и обеспечивая смазку и охлаждение трущихся поверхностей, ММ подвергается комплексному воздействию ряда факторов, под влиянием которых



оно изменяет свои физико-химические свойства. Ухудшение смазочных свойств масла приводит к повышенному износу деталей и нарушению нормальной работы двигателя. Так как химический состав основной части масла при его работе не меняется, то при удалении инородных продуктов маслу можно придать многие первоначальные свойства.

На судах морского флота сохранение эксплуатационных показателей циркуляционного масла достигается очисткой его фильтрованием и сепарированием [10]. Из всех средств очистки для судовых ДВС большой мощности наиболее эффективным и рациональным является сепарирование. В барабанах тарельчатых сепараторов развиваются центробежные ускорения, которые на средних радиусах тарелок в 1–8 тыс. раз превышают гравитационное ускорение. За счет этого достигается высококачественная очистка от различных механических примесей и воды.

Система сепарирования циркуляционного масла главных двигателей теплоходов состоит из сепаратора, подогревателя масла (парового или электрического), арматуры и трубопроводов. Так как она включена параллельно СС, то сепарирование ММ можно вести независимо от работы главного двигателя и его системы смазки.

Из-за особенностей подключения сепаратора к СС оптимальным будет режим, поддерживающий концентрацию НРП (механических примесей) в циркуляционной системе двигателя на самом низком уровне, а не режим, дающий минимальное содержание загрязнений в выходящем из сепаратора очищенном масле. Действительно, если осуществлять эксплуатацию ЦС со сравнительно низкой (минимальной) пропускной способностью (производительностью), то выходящее из него масло будет хорошо очищено. Однако в единицу времени очищается меньшая часть масла, находящегося во всей системе смазки.

При работе сепаратора с максимальной производительностью качество очистки масла, выходящего из сепаратора, будет низким, но зато в единицу времени очистке подвержена большая часть масла, находящегося в сточной цистерне. Минимальная и максимальная пропускная способность сепарирования почти всегда устанавливает высокую концентрацию загрязнений в СС. Минимальной концентрации чаще всего соответствует какая-то промежуточная производительность.

Комплекс «дизель – сепаратор – масло – фильтр» (при его параллельном включении и непрерывной работе) обладает свойствами саморегулирования. При выбранном режиме сепарирования концентрация механических примесей стабилизируется на таком уровне, при котором наступает равенство абсолютных значений количеств поступаемых и удаляемых загрязнений. При нарушении этого равенства концентрация механических примесей в системе будет изменяться до нового его наступления. Со стороны поступаемых примесей равенство перестает существовать не только в случае изменения скорости поступления загрязнений (количественная сторона), но и при изменении дисперсно-физического их состава (качественная сторона).

На нарушение равенства со стороны удаляемых примесей влияют выбранные режимы сепарирования. Установление нового режима сепарирования приводит к кратковременному изменению скорости удаления загрязнений. Однако через некоторое время последняя снова становится равной скорости поступления, но уже при другой концентрации механических примесей в системе. Нарушение равенства, а следовательно, изменение концентрации механических примесей в СС при сепарировании будет характеризовать переходный процесс очистки. Сохранение постоянной концентрации при совместной работе системы сепарирования и двигателя определяет установившийся процесс.

На основании практических исследований, установлена зависимость между концентрацией механических примесей в СС двигателя и производительностью сепарирования. На рис. 1 приведена эта зависимость, соответствующая условию сепарирования масел группы Б<sub>2</sub> и В<sub>2</sub> (ГОСТ 17479.1-2015) на всех производительностях с постоянной рекомендованной температурой подогрева и при условии постоянства качественно-количественной характеристики поступаемых загрязнений. Концентрация механических примесей в системе выражена в процентах по массе (с, %). Переменная пропускная способность сепарирования Q<sub>с</sub> выражена в процентах по отношению к паспортной производительности сепаратора Q<sub>п</sub>.

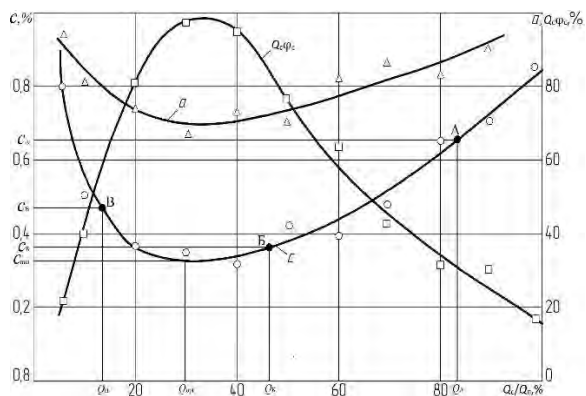


Рис. 1. Зависимость показателей загрязнения и очистки ММ от  $Q_c/Q_n$

Характер кривой таков, что в некоторой части ее концентрация механических примесей имеет малые значения. Именно эта часть и будет определять рабочие производительности сепаратора, на которых его нужно эксплуатировать. Минимум кривой, соответствующий минимальному значению концентрации, определяет оптимальную  $Q_{opt}$  пропускную способность ЦС. Для большинства двигателей при работе их на маслах с присадками среднего диспергирующего уровня  $Q_{opt}$  составляет около одной трети паспортной производительности сепаратора.

При сепарировании с  $Q_{opt}$  интенсивность очистки  $Q_{сфс}$  ММ устанавливается на самом высоком уровне, что способствует снижению скорости а старения масла и поступления в СС НРП на самом низком уровне. Как видно из зависимости  $a(Q_c/Q_n)$ , глубокая очистка масла на режиме значения  $Q_{opt}$  тормозит его

старение и способствует снижению концентрации НРП.

При сепарировании масел группы  $G_2$  и  $D_2$  с многофункциональными или моющими присадками высокого функционального уровня оптимальная пропускная способность ЦС смещается в сторону меньшего значения и составляет уже четвертую часть паспортной производительности сепаратора. Происходит это из-за диспергирующего действия многофункциональной присадки. Покрывая поверхность частичек загрязнений и являясь полярноактивным веществом, мощная присадка препятствует их укрупнению. Все это приводит к тому, что при работе двигателя на масле с моюще-диспергирующей присадкой все нерастворимые в масле частицы находятся в мелкодисперсном состоянии. Удаление их требует более длительного воздействия центробежных сил, а это возможно только при эксплуатации на меньшей производительности.

После ремонта двигателя или в случае сильного загрязнения циркуляционного масла водой и механическими примесями сепарирование необходимо вести на максимально возможной производительности. Длительность такого режима должна быть не менее двух–трехкратного прохождения всего масла СС через сепаратор.

Многолетняя практика сепарирования циркуляционных масел с различным их подогревом перед подачей в сепаратор дает возможность рекомендовать следующие температуры: 60–70 °С – для масел с низкими термоочистительными свойствами, 70–80 °С – для масел с термостойкими присадками. Данные температуры подогрева обеспечивают надежную и эффективную очистку масел. При эксплуатации системы сепарирования необходимо выбирать оптимальные режимы очистки. Часто это бывает затруднительно, так как немногие сепараторы снабжены расходомерами. Нельзя точно определить и концентрацию механических примесей в масле судовыми методами контроля. Но определить режим, поддерживающий минимальную концентрацию загрязнений в системе, можно. Предположим, что ведется продолжительное сепарирование с некоторой производительностью  $Q_d$  (рис. 1). Тогда в случае установившегося процесса очистки концентрация в системе станет равной  $c_d$ . Если теперь изменить производительность на  $Q_b$ , то наступит переходный процесс. Он будет длиться до тех пор, пока концентрация от значения  $c_d$  не уменьшится до значения  $c_b$ . Такое падение концентрации в этот период возможно только при условии превышения скорости удаления примесей над скоростью их поступления. Как только концентрация примет значение  $c_b$  наступит установившийся процесс очистки, при котором скорости поступления и удаления загрязнений будут равны. При изменении производительности сепаратора на  $Q_b$  снова наступит переходный процесс. Только в этом процессе концентрация загрязнений в системе будет уже не падать, а расти до значения  $c_b$ . Увеличение концентрации происходит из-за того, что в этот период, скорость удаления загрязнений меньше, чем скорость их поступления. Следовательно, при постоянной скорости поступления механических примесей в переходном процессе скорость их удаления будет

больше или меньше скорости поступления, Любой переходный процесс, в котором скорость удаления примесей больше скорости поступления, будет приближать систему к оптимальному режиму. Выбранный режим по производительности чем ближе расположен к оптимальному, тем больше у него начальная скорость удаления загрязнений в переходном процессе. Действительно, если после сепарирования в установившемся режиме перейти к переходным процессам с производительностями  $Q_b$ ,  $Q_{opt}$ ,  $Q_b$ , то можно убедиться в том, что скорость удаления механических примесей при производительности  $Q_{opt}$  будет наибольшая.

Используя это свойство переходного процесса, всегда можно определить оптимальную пропускную способность сепарирования. С этой целью для нескольких положений клапана, регулирующего производительность сепарирования, необходимо замерить накопление шлама в барабане сепаратора за некоторый постоянный промежуток времени. Положение клапана, при котором наблюдается наибольший выход загрязнений в барабан, и будет определять оптимальную производительность. Период сепарирования при испытании с каждой производительностью должен быть обязательно одинаковым и не очень продолжительным – порядка 2–12 ч. Слишком длительный период может сильно изменить исходную концентрацию загрязнений в системе, которая для сравнения режимов должна быть постоянной. Изменение ее скажется на скорости удаления загрязнений в переходных процессах при втором и последующих положениях клапана, и выбор оптимальной пропускной способности будет затруднен.

Очень малый период также нежелателен, так как в эксплуатационных условиях трудно будет уловить разницу в количестве накапливаемого шлама из-за его малых абсолютных значений. Чем меньше емкость системы и больше скорость поступления в нее загрязнений, тем кратковременней должен быть период испытаний на каждом режиме. Для крейцкопфных дизелей он продолжительнее, чем для тронковых.

Изменение качественно-количественной характеристики поступающих примесей может привести к тому, что ранее выбранная оптимальная производительность при этом уже окажется не оптимальной. Так что периодически ее нужно проверять и при необходимости корректировать.

Чем выше у сепаратора значение индекса производительности (фактора, определяющего его способность производить разделение), тем ниже концентрация механических примесей в СС при прочих равных условиях. Сепаратор должен быть подобран с такой паспортной производительностью, чтобы на оптимальном режиме в течение суток он мог сепарировать все масло смазочной системы 1,5 – 2,5 раза.

#### **Определение оптимальной пропускной способности центробежного сепаратора по результатам экспериментального моделирования**

Мониторинг работы сепаратора в СС судовых дизелей показал, что режим максимальной скорости удаления из ММ нерастворимых примесей зависит от многих факторов. Подключение его в СС двигателя

по байпасной схеме позволяет сепаратору с паспортной производительностью многократно обрабатывать масло, находящееся в сточно-циркуляционной цистерне. При этом глубина очистки масла оказывается не высокой, но достаточно эффективно и сравнительно быстро из масла удаляются крупнодисперсные механические примеси и глобулы воды. При задании более низкой пропускной способности ЦС по сравнению с паспортной глубина очистки ММ повышается, но время нахождения в циркуляционном масле крупных НРП до выделения сепаратором возрастает, что неблагоприятно сказывается на износе двигателя.

С целью настройки автоматизированной системы управления выбором оптимального режима сепарирования ММ осуществлена оценка эффективности ЦС в смазочных системах судовых тронковых дизелей. Были выделены следующие факторы, влияющие на выбор оптимальной пропускной способности сепаратора. Прежде всего это дисперсный состав нерастворимых загрязнений

масла в циркуляционной системе смазки двигателей. Он задавался средним размером  $m_d$  частиц нерастворимых примесей и дисперсией  $\sigma_d$  их распределения по диаметру.

Существенное влияние на выбор  $Q_{opt}$  оказывает качество очистки масла сепаратором на паспортной пропускной способности  $Q_n$ . Эффективность отфуговывания НРП на этом режиме фиксировалось по номинальной тонкости отсева  $\Delta_{0,95}$  сепаратора. Так как сепаратор функционирует по байпасной схеме очистки, то важную роль в этом процессе играет вместимость  $G_0$  сточно-циркуляционной цистерны масла, к которой подключается ЦС.

Мониторинг параметров системы очистки масла в судовых дизелях позволил выделить границы варьирования указанных выше факторов. В табл. 1 приведены их значения на нижнем и верхнем уровнях. Средний уровень задан для условий представления значений факторов в нейтральном и логарифмическом виде.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

| Факторы  | Кодовое обозначение | Интервалы варьирования | Уровни факторов |                 |            |
|--|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------|
|  |                     |                        | нижний -1       | основной 0      | верхний +1 |
| Средний размер нерастворимых примесей в масле $m_d$ , мкм                  | $x_1$               | 0,25                   | 0,5             | 0,75<br>(0,711) | 1          |
| Паспортная производительность сепаратора, $Q_n$ т/ч                        | $x_2$               | 2                      | 2               | 4<br>(3,46)     | 6          |
| Дисперсия распределения нерастворимых загрязнений $\sigma_d$ , мкм         | $x_3$               | 0,3                    | 0,2             | 0,5<br>(0,4)    | 0,8        |
| Вместимость картера двигателя (сточно-циркуляционной цистерны) $G_0$ , т   | $x_4$               | 5                      | 5               | 10<br>(8,67)    | 15         |
| Номинальная тонкость отсева центробежного сепаратора $\Delta_{0,95}$ , мкм | $x_5$               | 2,5                    | 3               | 5,5<br>(4,9)    | 8          |

Разработка модели оптимального сепарирования смазочного масла в двигателях строилась на концепции линейной зависимости  $Q_{opt}$  от приведенных в табл. 1 факторов. Принято допущение слабого влияния уровня концентрации НРП в масле при его комбинированной очистке полнопоточным фильтрованием и частичнопоточным сепарированием. В диапазоне загрязнения масла этими продуктами на уровне 0,5–4 % этот фактор незначительно влияет на выбор режима сепарирования при очистке ММ [3]. Такое же заключение было сделано и по скорости поступления нерастворимых продуктов в масло циркуляционных систем смазки большинства обследованных дизелей. При росте скорости поступления загрязнения в масло от 20 до 100 г/ч смещение  $Q_{opt}$  в сторону увеличения пропускной способности, как показали эксперименты на судах, не превышает 7 %. Поэтому этим фактором пренебрегли.

Функцией отклика при построении модели оптимального сепарирования принято установившееся минимальное  $C_{min}$  значение концентрации НРП в ММ, определяемое центрифугированием (ГОСТ20684-75). Рассматривался установившийся режим

сепарирования, когда скорости поступления и удаления нерастворимых примесей в смазочное масло равны. Такой режим функционирования СС благоприятен для низкого изнашивания деталей двигателя, высоких сроков службы ММ и автономной (необслуживаемой) работы СРФ.

Наиболее выгодный (оптимальный) режим сепарирования ММ выбирался путем многократной «пристрелки» с контролем состояния масла и накопления шлама в ЦС. На каждом этапе судового эксперимента рассматриваемые факторы закреплялись на определенном уровне, задаваемом матрицей планирования. На основании априорной информации аппроксимацию результатов эксперимента осуществляли показательно-степенным позиномом, который минимизировался логарифмированием. Значение факторов кодировали согласно рекомендациям [4].

Для сокращения объема испытаний в активном эксперименте использовалась регулярная четверть реплика  $2^{5-2}$ , задаваемая генерирующими соотношениями  $x_4 = x_1 x_2 x_3$ ,  $x_5 = x_2 x_3$  с определяющим контрастом  $1 = x_1 x_2 x_3 x_4$  и  $1 = x_2 x_3 x_5$ , по которому определена полная характеристика разрешающей способности принятой матрицы планирования.

Матрица планирования реплики представлена табл. 2. Для уменьшения систематических ошибок опыты проводили в случайном порядке.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты опытов

| Номер опыта | $x_0$         | $m_d$<br>$x_1$  | $Q_n$<br>$x_2$  | $\sigma_d$<br>$x_3$ | $G_0$<br>$x_4$  | $\Delta_{0,95}$<br>$x_5$ | $y_j$   | $\ln y_j$ | $\ln \hat{y}_j$ | $(\ln y_j - \ln \hat{y}_j)^2$ |
|-------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|--------------------------|---|-----------|-----------------|-------------------------------|
| 1           | +             | +               | +               | -                   | -               | -                        | 1176  | 7,07      | 7,03            | 0,0016                        |
| 2           | +             | -               | +               | -                   | +               | -                        | 670   | 6,51      | 6,44            | 0,0049                        |
| 3           | +             | +               | -               | -                   | +               | +                        | 290   | 5,67      | 5,60            | 0,0048                        |
| 4           | +             | -               | -               | -                   | -               | +                        | 95  | 4,55      | 4,51            | 0,0016                        |
| 5           | +             | +               | +               | +                   | +               | +                        | 1400  | 7,24      | 7,18            | 0,0036                        |
| 6           | +             | -               | +               | +                   | -               | +                        | 458   | 6,13      | 6,09            | 0,0016                        |
| 7           | +             | +               | -               | +                   | -               | -                        | 1625  | 7,39      | 7,35            | 0,0016                        |
| 8           | +             | -               | -               | +                   | +               | -                        | 926   | 6,83      | 6,77            | 0,0036                        |
| $b_i$       | $b_0$<br>6,42 | $b_1$<br>0,4187 | $b_2$<br>0,3138 | $b_3$<br>0,4738     | $b_4$<br>0,1387 | $b_5$<br>-0,5262         | $S_R = \sum_{j=1}^8 (\ln y_j - \ln \hat{y}_j)^2 = 0,0234$ |           |                 |                               |

Коэффициенты уравнения регрессии приведены в нижней части табл. 2. Их рассчитывали по

формулам  $b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j$ ;  $b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{N}$ , где  $x_{ij}$  –

кодированное значение  $i$ -го фактора в  $j$ -ом опыте;  $y_j$  – значение функции отклика в  $j$ -ом опыте;  $N$  – число опытов в матрице планирования.

Дисперсию воспроизводимости находим по трем ( $n_0=3$ ) параллельным опытам в центре плана

$$s_y^2 = \frac{(\ln y_u - \ln \bar{y}_u)^2}{n_0 - 1} = \frac{0,0034}{3 - 1} = 0,0017,$$

где  $\bar{y}_u$  – среднее арифметическое значение функции отклика в центре плана.

Средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии составляла

$$s\{b_i\} = \sqrt{\frac{s_y^2}{N}} = \sqrt{\frac{0,0017}{8}} = 0,0146.$$

Так как при 5 %-ном уровне значимости и числе степеней свободы  $n_0=3-1=2$  табличное значение критерия Стьюдента  $t_t$  равно 4,3, то доверительный интервал коэффициентов регрессии соответствует

$$\Delta b_i = t_t s\{b_i\} = 4,3 \cdot 0,0146 = 0,0627.$$

Все коэффициенты уравнения регрессии (см. табл. 2) по абсолютной величине больше доверительного интервала. Их можно считать статически значимыми. Поэтому модель выбора оптимальной пропускной способности сепаратора при представлении факторов, влияющих на этот процесс в кодированном виде, можно выразить следующим уравнением

$$\ln y = 6,42 + 0,4187x_1 + 0,3138x_2 + 0,4738x_3 + 0,1387x_4 - 0,5262x_5. \quad (1)$$

Проверка модели (1) на адекватность осуществлялась по критерию Фишера. Для этой цели по данным табл. 2 рассчитывали дисперсию адекватности

$$s_{ад}^2 = \frac{S_R}{f_2} = \frac{\sum_{j=1}^N (\ln y_j - \ln \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)} = \frac{0,0232}{8 - (5 + 1)} = 0,0116,$$

где  $k$  – число факторов;  $f_2$  – число степеней свободы линейной модели.

Сопоставление дисперсий адекватности и воспроизводимости показывает, что при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы  $f_1=2$  и  $f_2=2$  расчетный критерий Фишера

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} = \frac{0,0116}{0,0017} = 6,8 \text{ меньше табличного}$$

( $F_{\tau=19,2}$ ), поэтому модель (1) следует признать адекватной. Об этом также свидетельствует высокое рассчитанное по данным табл. 2 значение коэффициента множественной корреляции, которое составляет 0,96.

Для перехода от кодированных значений факторов к натуральным в уравнении (1) подставим значение факторов  $x_i$ , выраженные через натуральные их значения (см. табл. 1). После его преобразования и потенцирования получим исходную модель в виде следующего позиннома

$$Q_{opt} = 2743 m_d^{1,208} Q_n^{0,571} \sigma_d^{0,684} G_0^{0,232} \Delta_{0,95}^{-1,073}. \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой математическое описание объекта управления – пропускной способности ЦС при его функционировании в СС судовых дизелей. Анализ уравнений (1) и (2) показывает, что наибольшее влияние на  $Q_{opt}$  оказывает номинальная тонкость отсева  $\Delta_{0,95}$  сепаратора. Существенную роль в формировании исследуемого показателя играет дисперсный состав загрязнения масла НРП, задаваемый параметрами  $m_d$  и  $\sigma_d$ . Менее всего на выбор  $Q_{opt}$  оказывает вместимость  $G_0$  сточно-циркуляционной цистерны масла. Паспортная  $Q_n$  производительность ЦС занимает промежуточное положение между  $m_d$  и  $\sigma_d$  во влиянии на оптимальную пропускную способность сепаратора. Увеличение всех факторов кроме  $\Delta_{0,95}$  способствует росту  $Q_{opt}$ .

Зависимость (2) рекомендуется к использованию для настройки системы «самоочищающийся фильтр – центробежный сепаратор» с целью достижения наиболее эффективных режимов его функционирования. При работе в режиме  $Q_{opt}$  достигается минимальный уровень загрязнения ММ нерастворимыми примесями, старение масла происходит с наименьшей скоростью, так как из него

эффективно удаляются продукты срабатывания присадок и изнашивания двигателя, катализирующие окислительные процессы. Кроме того, ослабляя «грязевую» нагрузку на СРФ, сепаратор, работая в оптимальном режиме, создает условия для повышения автономности функционирования КСТОМ.

### Адаптивная система управления эффективностью комбинированного маслоочистительного комплекса

Комбинированная система тонкой очистки ММ на основе полнопоточного СРФ и самоочищающегося ЦС является наиболее эффективным средством ресурсосберегающей эксплуатации судовых тронковых дизелей [1, 5]. Этот маслоочистительный комплекс способен в автоматизированном режиме длительно поддерживать загрязнение ММ и его моющие-диспергирующие свойства на уровнях, обеспечивающих низкое изнашивание и нагарообразование деталей двигателя. При этом существенно важным является предотвращение задира и проворачивание вкладышей подшипников и интенсивное удаление из масла СС продуктов, интенсифицирующих его старение. Надежная работа автоматизированного маслоочистительного комплекса возможна при адаптивном управлении пропускной способностью ЦС с учетом влияния на  $Q_{opt}$  выявленных в результате проведенных исследований факторов.

В качестве обобщенного показателя оценки эксплуатационных свойств ММ дизеля предложено использовать частоту регенерации СРФ. Согласно зависимости  $N_p = A_{\phi} \frac{Q_{\phi}}{g_{\phi}} \varphi_{\phi c}$ , этот показатель

пропорционален пропускной способности фильтра  $Q_{\phi}$ , полноте отсева загрязнений  $\varphi_{\phi}$  и уровню с накопления их в масле [11]. Частота  $N_p$  находится в обратной зависимости от грязеемкости  $g_{\phi}$  фильтрующих элементов. Коэффициент пропорциональности  $A_{\phi}$  формируется режимом фильтрования, конструкцией СРФ и типом применяемого фильтровального материала [12]. Таким образом, период фильтрования между регенерацией элементов или частота регенераций пропорциональна количественной  $s$  и качественной  $\varphi_{\phi}$  характеристике загрязнения масла, которая, как это видно из формулы 2, формирует оптимальную пропускную способность сепаратора. На основе представленной зависимости для выбора  $Q_{opt}$  предложен самонастраивающийся поисковый регулятор (СПР) адаптивного типа (А.С. SU1201537A1) [1]. Входным параметром СПР является частота регенерации СРФ, а выходным – сигнал управления регулирующим органом пропускной способности сепаратора.

Для повышения эффективности очистки ММ путем поддержания оптимальной пропускной способности ЦС ее регулируют пропорционально изменению частоты регенерации фильтрующих элементов. При росте показателя  $N_p$  пропускную способность сепаратора увеличивают, что наблюдается при фильтровании масла с низкими диспергирующими и стабилизирующими свойствами. С падением  $N_p$ , которое проявляется при очистке ММ

с высокими диспергирующими характеристиками, пропускную способность ЦС необходимо уменьшать.

Реализация рассматриваемого способа повышения эффективности очистки ММ в ДВС сепарированием осуществлена следующим образом (рис. 2). В комбинированной схеме очистки полнопоточный контур замкнут на саморегенерирующийся фильтр 6, байпасно подключенный к циркуляционной цистерне 8 сепаратор 1 очищает масло с регулированием его пропускной способности клапаном 2. Управление регулирующим органом осуществляется анализатором 3, в котором формируется сигнал управления.

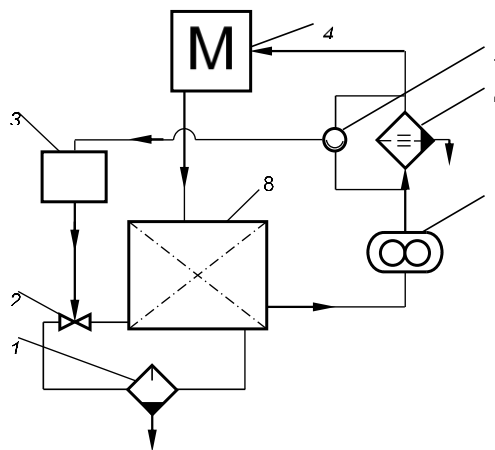


Рис. 2. Схема включения СПР в систему смазки дизеля:

1 – сепаратор; 2 – клапан управления; 3 – анализатор; 4 – ДВС; 5 – дифференциальный манометр; 6 – СОФ; 7 – насос подачи масла; 8 – циркуляционная цистерна

Регенерация фильтровальных элементов СРФ обратным потоком фильтруемого масла при достижении заданного перепада, например, 0,08–0,1 МПа. Перепад давлений на фильтре 2, регистрируется дифференциальным манометром 3 с переключателем, фиксирующим цикл регенерации фильтра. Манометр 3 связан анализатором 4, в который поступает сигнал о проведении регенерации.

Анализатор содержит два преобразователя 9 и 10 (рис 4), соответственно время–код и код–время, буферные регистры 11 и 12 текущего и предыдущего состояния. Вход преобразователя 9 «время–код» связан с дифференциальным манометром 3, а выход с буферным регистром 11. Выход последнего связан с запоминающим устройством 13. Запоминающее устройство 13, арифметико-логическое устройство 14 и блок управления синхронизации сигналов 15, в адресных ячейках которого закодировано длительность импульсов позволяют реализовать любой линейный закон управления регулирующим органом 5, т.е. пропускной способностью сепаратора. Сигнал из соответствующей адресной ячейки поступает в арифметико-логическое устройство 14, выход которого связан со схемой управления электродвигателем регулирующего органа 5.

Автоматизированная схема регулирования пропускной способности ЦС с анализатором 4 работает следующим образом. При достижении на СРФ предельного перепада давлений начинается

регенерация его фильтрующих элементов и дифференциальный манометр 3 замыкает контакты. Анализатор фиксирует время между импульсами характеризующими частоту регенерации и преобразует его в импульс длительности. Который управляет работой регулирующего органа 5. Последний изменяет свое положение в соответствии с длительностью импульса и задает требуемую оптимальную пропускную способность сепаратору.

В анализаторе 4 при получении сигнала от дифференциального манометра 3 преобразователь 9 «время-код» начинает счет времени. При поступлении следующего сигнала счет времени прекращается и время между импульсами, преобразованное в двоичный код, поступает в буферный ресивер 11 и запоминается. Сигнал из буферного ресивера поступает в запоминающее устройство 13, в адресных ячейках которого закодирована длительность импульсов, управляющих работой электродвигателя регулирующего органа 5

В СГР сигнал из соответствующей адресной ячейки (рис. 3.) поступает в арифметико-логическое устройство 5, куда одновременно поступает сигнал из буферного регистра 4 предыдущего состояния о пропускной способности сепаратора. В арифметико-логическом устройстве 5 сигналы вычитаются. Далее объединенный сигнал поступает на вход преобразователя 6 «код-время», где формируется импульс, поступающий в схему управления работой электродвигателя регулирующего органа.

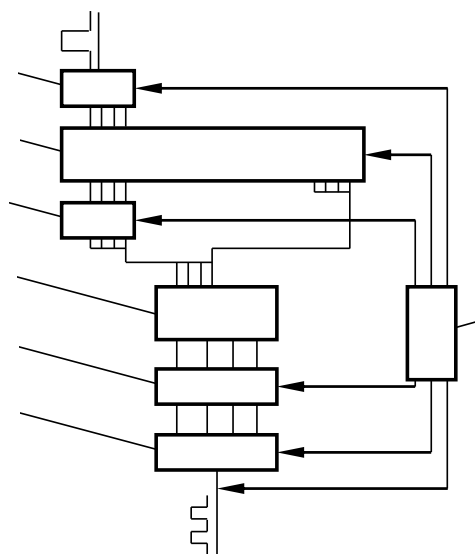


Рис. 3. Блок-схема СГР, оптимизирующего функционирование ЦС:

- 1, 6 – преобразователь "код-время";
- 2, 4 – буферный регистр;
- 3, 5 – запоминающее и логическое устройства;
- 7 – блок управления

Автоматизированное управление работой сепаратора с выбором оптимальной пропускной способности ЦС в КСТОМ дизелей с СРФ, оснащенных периодическим режимом регенерации, оттарировано с использованием зависимости (2). Выбор  $Q_{opt}$  с использованием СГР осуществлен в КСТОМ, оснащенных ЦС, индекс производительности которых превышает  $\Sigma_{min}$ . Минимальная очистительная способность

сепараторов рассчитывается по методике [13] с учетом уровня форсирования дизеля и качества применяемых топлив и смазочных масел.

Управление работой ЦС на основе предложенного устройства обладает свойствами адаптивности. Оно нацелено на повышение дисперсности загрязнения масла НРП, что сопровождается снижением  $N_p$  и величины  $Q_{opt}$  сепаратора при стабилизации внешних условий, от которых зависит старение ММ.

Самонастраивающийся поисковый регулятор выбора наиболее выгодной пропускной способности ЦС, при которой в СС устанавливается самая низкая концентрация высокодисперсных НРП, прошел апробацию в тронковых дизелях WASA32 (6ЧН32/35), 9L28/32А-F (9ЧН28/32) и 8ДН35/62 [1. 4, 5]. В этих ДВС при использовании низкосортных топлив было достигнуто ресурсосберегающее маслоиспользование с переводом ММ в режим бессменной работы.

### Выводы

1. Разработан самонастраивающийся поисковый регулятор выбора оптимального режима очистки ММ сепарированием в СС судовых дизелей, оснащенных полнопоточными саморегенерируемыми фильтрами. Обоснована и экспериментально подтверждена возможность контроля и оценки состояния смазочного масла фиксированием частоты периодической противоточной регенерации фильтрующих элементов СРФ, которая использована как сигнал управления работой ЦС при выборе его оптимальной пропускной способности. Применение СГР позволяет в условиях динамически изменяющихся характеристик химмотологического комплекса «дизель – сепаратор – масло – фильтр» адекватную настройку ЦС на режим работы, при котором накопление в ММ механических примесей будет находиться на минимальном уровне при самой высокой их дисперсности, что снижает интенсивность старения масла и изнашивания основных деталей дизеля.

2. Получена расчетно-экспериментальная модель выбора  $Q_{opt}$  сепаратора в зависимости от различных эксплуатационных факторов, главными из которых являются паспортные характеристики сепаратора (номинальная тонкость отсева и производительность), дисперсность нерастворимых загрязнений масла и вместительность системы смазки. Доказано, что при минимальной и максимальной пропускной способности ЦС, когда эффективность удаления НРП за один проход через сепаратор самая высокая, но сточно-циркуляционная цистерна за сутки обрабатывается менее одного раза или многократное пропускание всего объема масла в цистерне за сутки при низкой эффективности его очистки за один проход через сепаратор, не возможно поддерживать загрязнение ММ на низком уровне. Установлено, что самое высокое удаление из масла нерастворимых примесей наблюдается при пропускной способности сепаратора 20–30 % от паспортной при очистке масла группы Д<sub>2</sub> и 30–40 % – групп В<sub>2</sub> и Г<sub>2</sub>.

3. Проведенные исследования показали, что одним из наиболее эффективных путей по увеличению ресурсных показателей судовых дизелей с автоматизированной системой смазки

является комбинированная очистка ММ от грубодисперсных механических примесей полнопоточным фильтрованием для надежной защиты подшипников от проворачивания и абразивного изнашивания и глубокой очистки масла от мелкодисперсных НРП сепарированием на режиме  $Q_{opt}$ , что способствует удалению из масла катализаторов окисления и замедляет его старение. Установка в системе смазки СПР позволяет:

- осуществить оптимальное адаптивное управление режимами работы ЦС;
- обеспечить высокую работоспособность системы очистки масла в условиях постоянного параметров комплекса «дизель – сепаратор – масло – фильтр»;
- повысить надежность функционирования систем и агрегатов маслоподготовки судовых автоматизированных дизелей.

#### Литература

1. Надежкин А.В., Кича Г.П., Семенюк Л.А. Оптимизация режимов комбинированной очистки моторного масла в судовых дизелях методами вариационного исчисления // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37). Т.2. С. 93–100.
2. Кича Г.П., Семенюк Л.А., Тарасов М.И. Стохастическая ячеистая модель очистки моторного масла от механических примесей объёмным фильтрованием // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №1(47). Т.2. С. 105–112.
3. Воробьев Б.Н., Надежкин А.В., Кича Г.П. Стохастическое моделирование разделения сложных гетерогенных систем судовых устройств на основе представлений и аппарата случайных марковских процессов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37). Т.2. С. 112–120.
4. Кича Г.П., Надежкин А.В., Семенюк Л.А. Новые стохастические модели очистки топлив и масел судовыми центробежными аппаратами со сложной гидродинамической обстановкой // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4(42). Т.5. С. 77–89.
5. Кича Г.П., Воробьев Б.Н., Семенюк Л.А. Комбинирование фильтрования и центрифугирования – эффективный метод полнопоточной тонкой очистки масла в двухконтурных системах смазки судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4(42). Т.5. С. 59–65.
6. Кича Г.П. Решение проблемы высокоэффективной очистки моторного масла в судовых дизелях: специальность 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кича Геннадий Петрович. Владивосток, 1992. 46 с.
7. Надежкин А.В., Безвербный А.В., Кича Г.П. Имитационная модель трибодиагностики двигателей внутреннего сгорания // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. №3. С. 6–14.
8. Кича Г.П., Надежкин А.В., Бойко С.П. Результаты эксплуатационных испытаний саморегенерирующегося фильтра в судовых дизелях в составе комбинированного маслоочистительного комплекса // Вестник гос. университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 4. С. 718–726.
9. Тарасов М.И., Кича Г.П. Исследование влияния угара масла на его старение и состояние малоразмерного дизеля // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. №3–4. С. 143–147.
10. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. 372 с.
11. Надежкин А.В., Кича Г.П. Трибомониторинг и трибодиагностика судовых дизелей. Mauritius: Palmarium Academic Publishing, 2018. 422 с.
12. Микутенок Ю.А., Шкаренко В.В., Резников В.Д. Смазочные системы дизелей. Л.: Машиностроение, 1986. 125 с.
13. Молоков Н.С., Кича Г.П., Тарасов М.И. Моделирование влияния индекса производительности центробежного сепаратора смазочной системы на изнашивание судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 3. № 4 (54). С. 79–85.
14. Кича Г.П., Тарасов М.И. Конструктивные и эксплуатационные методы снижения угара моторного масла в судовых дизелях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 3–4. С. 138–143.

#### References

1. Nadezhkin A.V., Kicha G.P., Semenyuk L.A. Optimizaciya rezhimov kombinirovannoj ochistki motornogo masla v sudovyh dizelyah metodami variacionnogo ischisleniya [The approaches of the variation solution of combined cleaning modes of motor oil in marine diesel engines] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. №3(37). Т.2. С. 93–100.
2. Kicha G.P., Semenyuk L.A., Tarasov M.I. Stohasticheskaya yacheistaya model' ochistki motornogo masla ot mekhanicheskikh primesej ob'omnym fil'trovaniem [Stochastic cellular model clean motor oil from mechanical impurities by filtration bulk]// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. №1(47). Т.2. С. 105–112.
3. Vorob'ev B.N., Nadezhkin A.V., Kicha G.P. Stohasticheskoe modelirovanie razdeleniya slozhnyh geterogennyh sistem sudovyh ustrojstv na osnove predstavlenij i apparata sluchajnyh markovskih processov [Stochastic separation modeling of complex heterogeneous system of ship devices on the basis of the concepts and apparatus of random mfrkov processes]// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. №3(37). Т.2. С. 112–120.
4. Kicha G.P., Nadezhkin A.V., Semenyuk L.A. Novye stohasticheskie modeli ochistki topliv i masel sudovymi centrobezhnymi apparatami so slozhnoj gidrodinamicheskoy obstanovkoj [New stochastic models for cleaning fuels and oils by marine centrifugal apparatus with a complex hydrodynamic situation]// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. №4(42). Т.5. С. 77–89.
5. Kicha G.P., Vorob'ev B.N., Semenyuk L.A. Kombinirovanie fil'trovaniya i centrifugirovaniya – effektivnyj metod polnopotochnoj tonkoj ochistki masla v dvuhkonturnyh sistemah smazki sudovyh dizelej [The combination of

- filtration and centrifugation – an efficient method is full-flow fine filtration of oil in a dual circuit lubrication systems of marine diesel engines]// Morskie intelektual'nye tekhnologii. 2018. №4(42). T.5. S. 59–65.
6. Kicha G.P. Reshenie problemy vysokoeffektivnoj oчитки motornogo masla v sudovyh dizelyah [Solving the problem of highly efficient cleaning of engine oil in marine diesel engines]: special'nost' 05.08.05 "Sudovye energeticheskie ustanovki i ih elementy (glavnye i vspomogatel'nye)» []: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Kicha Gennadij Petrovich. Vladivostok, 1992. 46 s.
  7. Nadezhkin A.V., Bezverbnij A.V., Kicha G.P. Imitacionnaya model' tribodiagnostiki dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Simulation model of tribodiagnosics of internal combustion engines]// Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah. 2009. №3. S. 6–14.
  8. Kicha G.P., Nadezhkin A.V., Boiko S.P. Rezul'taty ekspluatacionnyh ispytanij samoregeneriruyushchegosya fil'tra v sudovyh dizelyah v sostave kombinirovannogo masloochistitel'nogo kompleksa [The calculation regeneration parameters of self-cleaning filters for lubricant systems of ship diesels]// Vestnik gos. universitetata morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2019. T. 11. № 4. S. 718–726.
  9. Tarasov M.I., Kicha G.P. Issledovanie vliyaniya ugara masla na ego starenie i sostoyanie malorazmernogo dizelya [Investigation of the effect of oil fumes on its aging and the condition of a small diesel engine]// Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2017. №3–4. S. 143–147.
  10. Kicha G.P., Perminov B.N., Nadezhkin A.V. Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovyh dizelyah. [Resource-saving oil use in marine diesel engines] Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2011. 372 s.
  11. Nadezhkin A.V., Kicha G.P. Tribomonitoring i tribodiagnostika sudovyh dizelej [Tribomonitoring and tribodiagnosics of marine diesel engines]. Mauritius: Palmarium Academic Publishing, 2018. 422 s.
  12. Mikutenok YU.A., Shkarenko V.V., Reznikov V.D. Smazochnye sistemy dizelej [Diesel engine lubrication systems]. L.: Mashinostroenie, 1986. 125 s.
  13. Molokov N.S., Kicha G.P., Tarasov M.I. Modelirovanie vliyaniya indeksa proizvoditel'nosti centrobezhnogo separatora smazochnoj sistemy na iznashivanie sudovogo dizelya [Simulation of lubricating oil centrifugal separator performance index influence on marine diesel engine wear] // Morskie intelektual'nye tekhnologii. 2021. T. 3. № 4 (54). S. 79–85.
  14. Kicha G.P., Tarasov M.I. Konstruktivnye i ekspluatacionnye metody snizheniya ugara motornogo masla v sudovyh dizelyah [Design and operational methods of engine burning oil level in marine diesels] // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2017. № 3–4. S. 138–143.

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

**Николай Сергеевич Молоков**, аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

**Nikolai S. Molokov**, graduate student of the Department of marine internal combustion engines, Maritime state university named after admiral G.I. Nevel'skoy. 690003, Vladivostok, Verhneportovaya, 50a, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

**Сергей Петрович Бойко**, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского. 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

**Sergey P. Boiko**, Ph.D. (Eng), associate professor of the Department of marine internal combustion engines, Maritime state university named after admiral G.I. Nevel'skoy. 690003, Vladivostok, Verhneportovaya, 50a, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

**Павел Петрович Кича**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет 690087 г. Владивосток, ул. Луговая 52л, e-mail: pkicha@inbox.ru

**Pavel P. Kicha**, Ph.D. (Eng), associate professor of the Department of marine internal combustion engines, Far Eastern state technical fisheries university. 690087, Vladivostok, Lugovaya 52l, e-mail: pkicha@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 15.01.2022; одобрена после рецензирования 11.02.2022, принята к публикации 24.02.2022.

The article was submitted 15.01.2022; approved after reviewing 11.02.2022; accepted for publication 24.02.2022.



Научная статья

УДК 621.431.74.016

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.010>

## Результаты исследования оптических характеристик частиц сажи и параметров радиационного теплообмена в камере сгорания судового 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.** Тенденции развития современных судовых дизелей связаны прежде всего с увеличением их удельной мощности, улучшением параметров экономичности и экологических характеристик. Это обуславливает появление ряда проблем, важнейшей из которых является проблема тепловой напряжённости деталей, образующих камеру сгорания. Высокий уровень тепловых нагрузок указанных деталей судовых дизелей является одной из основных причин снижения их эксплуатационной надёжности. Ошибки в расчётных оценках теплового и напряженно-деформированного состояния деталей камеры сгорания на стадии проектирования в настоящий период достигают 30 – 80 %. Это вызывает необходимость совершенствование математических моделей, описывающих процессы теплообмена в камере сгорания судовых дизелей. Целью данной статьи является представление и обсуждение результатов исследований, проведенных авторами, по оптическим характеристикам частиц сажи и радиационному теплообмену в камере сгорания судового дизеля типа 6 ЧН 24/36. Экспериментально доказано, что частицы сажи, образующиеся в камере сгорания судового дизеля, могут быть отнесены к малым с оптической точки зрения. Значения средних за рабочий цикл локальных результирующих потоков излучения для поверхностей крышки цилиндра, поршня и втулки, представленные в статье, позволяют еще на стадии проектирования определить в них величину переменных температурных напряжений. Это очень важно для оценки надёжности работы деталей камеры сгорания в эксплуатации.

**Ключевые слова:** судовый дизель, частицы сажи, спектральный анализ, результирующий поток излучения.

**Для цитирования:** Руднев Б.И., Повалихина О.В. Результаты исследования оптических характеристик частиц сажи и параметров радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля, Морские интеллектуальные технологии 2022. Т. 1, Номер 1. С. 80—85

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.010>

## Results of investigation of optical characteristics particles of soot and parameters of radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber

Boris I. Rudnev<sup>1</sup> [povalichina@mail.ru](mailto:povalichina@mail.ru), Olga V. Povalikhina<sup>1</sup> [povalichina@mail.ru](mailto:povalichina@mail.ru)

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

**Abstract.** Tendency's of development modern of marine diesels are connected foremost in increasing of their specific power, improvement of parameters economical and ecological characteristics. It determines emergence series of problems important which appears problem thermal of details made the combustion chamber. High loads level of thermal this details in marine diesels is on of basic reason in descent their exploitation security. Errors in calculation estimations of thermal and power deformable condition in details of combustion chamber in designing gets 30 – 80 % now. It causes necessity performance of mathematical models of heat transfer process in marine diesels combustion chamber. Purpose this paper is represent and discussion investigations results, made authors, by optical characteristics soot particles and radiation heat transfer in the marine diesel combustion chamber 6ChN 24/36. It demonstrate experimental that soot particles getting in marine diesel combustion chamber appear to small for optical aspect. Data mean on working cycle of local resulting radiation heat transfer fluxes for heat of cylinder, piston and liner of cylinder surfaces, represented in the paper, makes in designing to estimate value variable temperature intensity. It is very important for estimation of security combustion chamber details during exploitation.

**Key words:** marine diesel, particles of soot, spectral analysis, resulting radiation heat transfer fluxes.

**For citation:** Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina, Results of investigation of optical characteristics particles of soot and parameters of radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber, Marine intelligent technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 80—85

### Введение

Тенденции развития современных дизельных двигателей, в том числе и судовых связаны, прежде всего с увеличением их удельной мощности, улучшением параметров экономичности и экологических характеристик. Это обуславливает появление ряда проблем, важнейшей из которых является проблема тепловой напряженности деталей, образующих камеру сгорания (КС). Высокий

уровень тепловых нагрузок деталей цилиндропоршневой группы современных судовых дизелей является одной из основных причин снижения их эксплуатационной надёжности. Состояние математических моделей (ММ), описывающих процессы переноса теплоты в КС дизельных двигателей в настоящее время таково, что ошибки в расчётных оценках теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы на стадии

проектирования достигают 30 – 80%. Последнее вызывает необходимость совершенствования как уже существующих ММ, так и разработку новых, которые могли бы более адекватно описывать упомянутые выше процессы.

Целью данной статьи является представление и обсуждение результатов расчетных и экспериментальных исследований, проведенных авторами. Тематика этих исследований охватывает весьма обширный круг вопросов, связанных с определением оптических характеристик частиц сажи и радиационного теплообмена в КС судового дизеля [1, 2, 3].

#### Оптические характеристики частиц сажи и результаты их спектрального анализа

Испытания судового дизеля 6 ЧН 24/36 проводились по стандартной нагрузочной характеристике [4] с регистрацией параметров рабочего процесса и отбором проб частиц сажи на пяти основных режимах: холостой ход, нагрузка 0% от номинальной мощности  $N_{e_{ном}}$ , а также 25, 50, 75 и 100% при частоте вращения коленчатого вала  $n=500$  мин<sup>-1</sup>. В результате обработки отобранных в процессе испытаний проб частиц сажи на сканирующем микроскопе с высокой разрешающей способностью S-5500 Hitachi (Japan) был получен массив электронно-микроскопических снимков, позволяющий выполнить количественный анализ оптических характеристик, как самих частиц сажи, так и их наноструктур.

На рис. 1 и 2 представлены электронно-микроскопические снимки частиц сажи и их наноструктур, относящихся к режиму холостого хода (0% нагрузки от  $N_{e_{ном}}$ ) судового дизеля 6 ЧН 24/36 при увеличении соответственно в 100 и 500 тысяч раз.

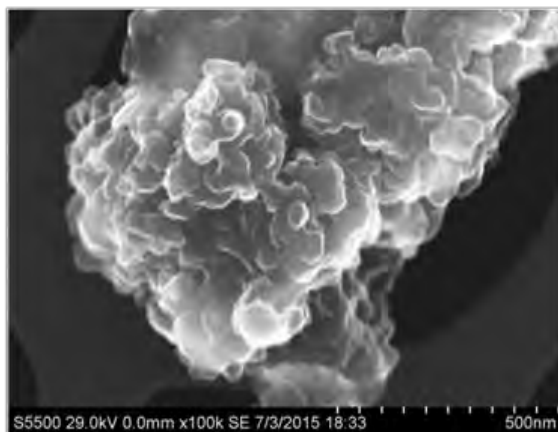


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 0% от  $N_{e_{ном}}$ , увеличение 100 тыс. раз

Размерная шкала электронного микроскопа, показанная на приведенных снимках, позволяет оценить как размеры наноструктур, в которые объединяются отдельные частицы сажи, так и размеры самих отдельных частиц.

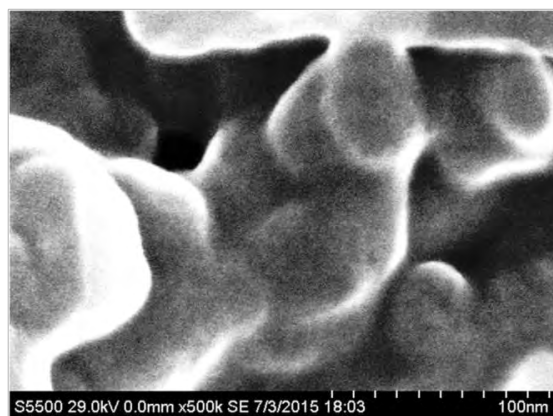


Рис. 2. Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 0% от  $N_{e_{ном}}$ , увеличение 500 тыс. раз

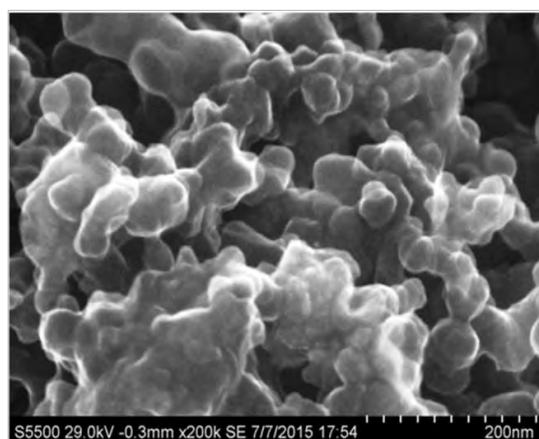


Рис. 3. Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 25% от  $N_{e_{ном}}$ , увеличение 200 тыс. раз



Рис. 4. Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 50% от  $N_{e_{ном}}$ , увеличение 200 тыс. раз

Частицы сажи и их наноструктуры, соответствующие нагрузке судового дизеля 6 ЧН 24/36 25% от  $N_{e_{ном}}$  при увеличении в 200 тысяч раз показаны на рис. 3.

А на рис. 4 и 5 представлены аналогичные экспериментальные данные при нагрузке указанного выше дизеля 50% и 100% от  $N_{e_{ном}}$ .

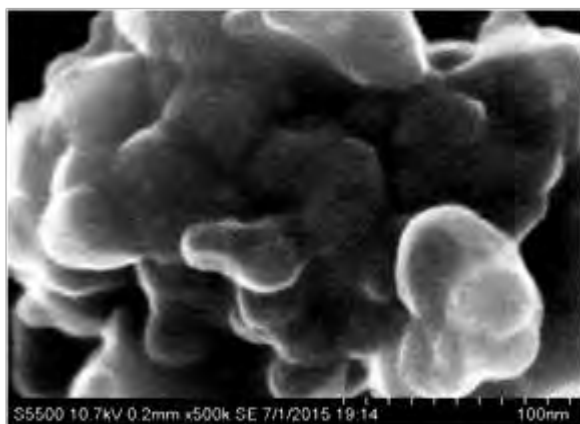


Рис. 5. Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100% от  $N_{e\text{ном}}$ , увеличение 500 тыс. раз

Анализ представленных на рис. 1 – 5 экспериментальных данных показывает, что по форме большинство частиц сажи близки к сфере, средний диаметр частиц сажи, образующихся в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36 составляет 35 нм (0,035мкм) и практически не зависят от нагрузки дизеля. Это положение подтверждается и другими исследователями [5 – 9]. При этом параметр дифракции для частиц сажи

$$\rho = \pi d / \lambda,$$

где  $d$  – средний диаметр частиц сажи, мкм;  $\lambda$  – длина волны излучения, мкм.

в области ближнего инфракрасного спектра ( $\lambda=0,5 – 6,0$  мкм) лежит в пределах  $\rho = 0,2 – 0,018$ . Среднее его значение для указанного спектрального диапазона составляет  $\rho_{\text{ср}} = 0,07$ , т.е. условие  $\rho \leq 0,1$  выполняется. Это позволяет считать экспериментально доказанным факт отнесения частиц дизельной сажи к малым с оптической точки зрения [10]. Последнее является принципиально важным фактом, так как известно, что аналитические выражения для спектрального коэффициента ослабления излучения для малых и больших частиц не совпадают [11, 12].

Сканирующий электронный микроскоп S-5500 позволяет проводить спектральный анализ исследуемых проб частиц сажи. На рис. 6 и 7 в качестве примера представлены результаты такого анализа для проб частиц сажи, полученные при работе судового дизеля 6 ЧН 24/36 на нагрузке 100% от  $N_{e\text{ном}}$ .

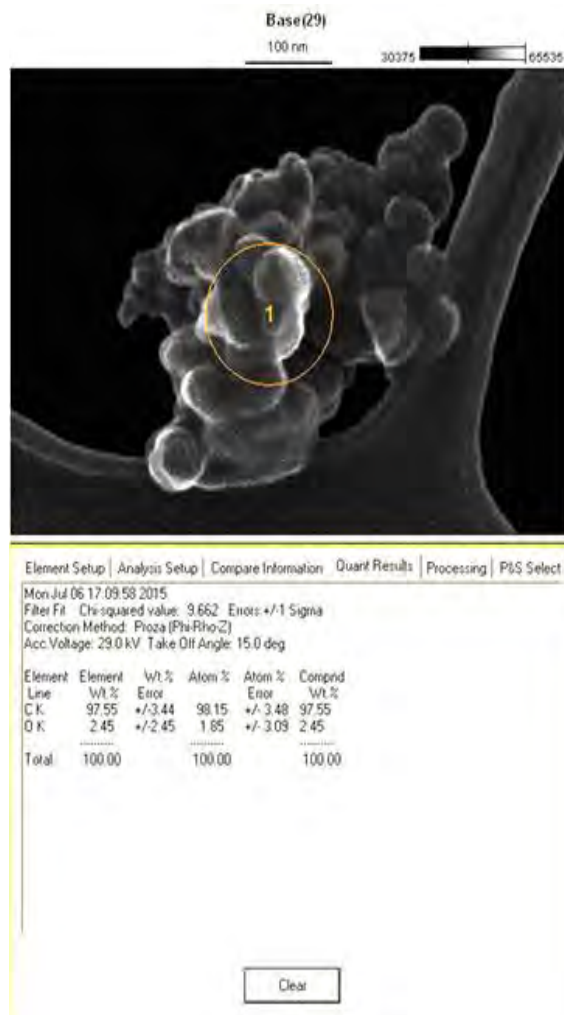


Рис. 6. Спектральный анализ частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100% от  $N_{e\text{ном}}$

Анализ представленных на рис. 6 и 7 данных показывают, что в пробах однозначно присутствует именно углерод С (сажа). При изменении нагрузки в диапазоне от 0 % до 100 % от номинальной мощности от  $N_{e\text{ном}}$ , содержание (весовое) углерода С (сажи) в пробах увеличивается от 69,48% до 97,55 %. Содержание кислорода О в пробах, как и следовало ожидать с ростом нагрузки уменьшается с 28,11 % при 0 % от от  $N_{e\text{ном}}$  до 2,45 % при 100 % от от  $N_{e\text{ном}}$ , что связано с интенсификацией процесса сгорания топлива в цилиндре судового дизеля. Содержание других химических элементов в пробах, в частности, железа Fe (как продукта износа деталей цилиндропоршневой группы), кремния Si и серы S незначительно и лежит в пределах от 1,03 % до 7 %. Распределение частиц сажи по размерам, как было показано ранее [13], существенно отличается от нормального.

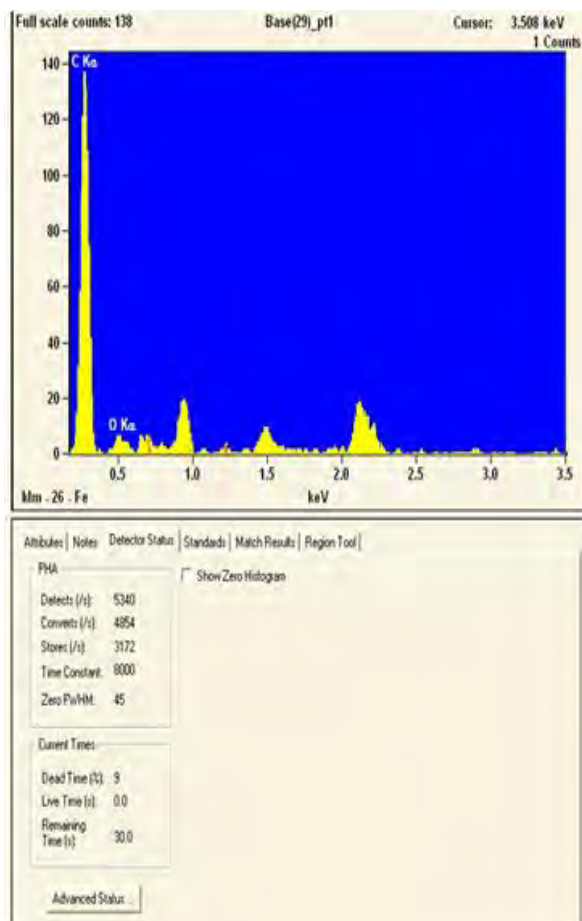


Рис. 7. Гистограмма распределения химических элементов в пробах, отобранных из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100% от  $N_{e\text{ном}}$

#### Локальные результирующие потоки излучения в камере сгорания судового дизеля

Точность расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы практически полностью зависит от правильного задания граничных условий по теплообмену [14, 15]. При этом в составе граничных условий необходимо достаточно корректно учитывать и составляющую, обусловленную теплообменом излучением в КС судового дизеля. Последнее обусловлено тем, что в период активного тепловыделения в цилиндре судового дизеля, доля теплообмена излучением в суммарном тепловом потоке, передаваемом от рабочего тела к поверхностям деталей КС составляет 45 – 55 % и более. Учитывая сложную геометрию КС современных судовых дизелей, а зачастую и наличие двух источников излучения (имеются ввиду судовых малооборотных дизелей с двумя форсунками в КС), значимость расчетной оценки локальных результирующих потоков излучения существенно возрастает. Отмеченное подтверждается и другими исследованиями в области радиационного теплообмена [16].

На рис. 8 представлены результаты расчетной оценки результирующих потоков излучения на

поверхностях поршня, крышки и втулки цилиндра судового дизеля 6 ЧН 24/36 при работе на режиме 100 % от номинальной мощности  $N_{e\text{ном}}$ . По своей физической сущности это средние за рабочий цикл результирующие потоки излучения для указанных выше поверхностей КС. Они могут быть использованы в качестве граничных условий при оценке теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы на стадии проектирования с целью определения переменных температурных напряжений, возникающих в этих деталях в течение рабочего цикла. Локальные результирующие потоки излучения в пределах поверхности одной детали, например, поршня и крышки цилиндра для указанного выше судового дизеля были представлены ранее в [2]. Эти потоки излучения необходимы на стадии проектирования для выяснения вопросов, связанных с наиболее нагруженными в тепловом отношении участками поверхности одной конкретной детали цилиндропоршневой группы. В количественном отношении представленные на рис. 8 значения локальных результирующих потоков излучения соответствуют известным экспериментальным данным [17].

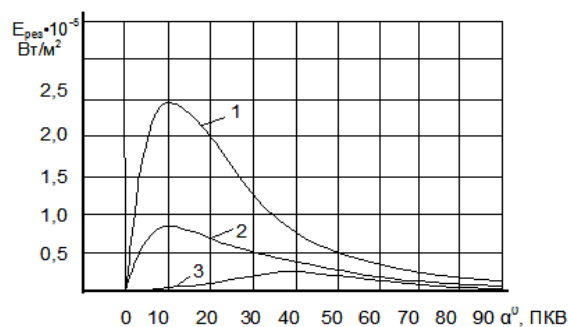


Рис. 8. Результирующие потоки излучения для поверхностей деталей, образующих камеру сгорания судового дизеля 6 ЧН 24/36, при нагрузке 100 % от  $N_{e\text{ном}}$ : 1 – поршень; 2 – крышка; 3 – втулки

#### Заключение

Представленные в статье результаты исследований оптических параметров частиц сажи, отобранных из КС судового дизеля 6 ЧН 24/36, экспериментально подтвердили факт возможности их отнесения к малым с оптической точки зрения. Это дало возможность в ММ локального радиационного теплообмена в КС судового дизеля пренебречь рассеиванием и считать, что ослабление излучения происходит лишь за счет поглощения. Приведенные значения средних за рабочий цикл локальных результирующих потоков излучения для поверхностей деталей, образующих КС, позволяет еще на стадии проектирования определить в них величину переменных температурных напряжений. Последнее очень важно для общей оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля и надежности их работы в процессе эксплуатации.

### Литература

1. Израильский Ю.Г., Повалихина О.В., Руднев Б.И. Математическая модель локального радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2016, №3 (33), Т.1, С. 146 – 151.
2. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Локальные оптико-геометрические характеристики и результирующие потоки излучения в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2018, №4(42), Т.5, С. 90 – 94.
3. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Расчетно-экспериментальное определение параметров излучения пламени в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2020, №4(50), Т.1, С. 98 – 102.
4. ГОСТ Р ИСО 3046-1-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 1. Стандартные исходные условия, объявленные мощность, расходы топлива и смазочного масла. Методы испытаний. – Введ. 2001-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1999, 23 с.
5. Вихерт М.М., Кратко А.П., Рафалькес И.С. и др. Влияние типа рабочего процесса и режима работы быстроходного дизеля на свойства сажи и отработавшие газы // Автомобильная промышленность, 1975, №10, С. 8 – 14.
6. Милликен Р.К. Размеры, оптические свойства и температура частиц сажи // Измерение температур в объемах новой техники. М.: Мир, 1965, С. 152 – 172.
7. Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полещук И.З. и др. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. М.: Машиностроение, 1989, 128 с.
8. Carpenter K., Johnson J.H. Analysis of the physical characteristics of diesel particulate matter using transmission electron microscope techniques // SAE Preprints, 1979, № 790815, 17 p.
9. Mohammad Samy I., Borman G.L. Measurement of soot and flame temperature along three directions in the cylinder of a D.I. diesel // SAE Techn. Pap, Ser., 1991, №910728, P. 1 – 15.
10. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991, 432 с.
11. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975, 934 с.
12. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York. Academic Press, 2003, 822 p.
13. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оценки спектральной оптической толщины пламени в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2020, №1(47), Т.2, С. 91 – 94.
14. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах тепловых двигателей. Л.: Машиностроение, 1983, 212 с.
15. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. Численный анализ элементов конструкции машин и приборов. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 480 с.
16. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 396 с.
17. Dent J.C., Siluaman S.I. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection Diesel engine // SAE Preprints, 1977, № 770407, 26p.

### References

1. Izrail'skij Ū.G., Povalihina O.V., Rudnev B.I. Matematiĉeskaâ model' lokal'nogo radiacionnogo teploobmena v kamere sgoraniâ sudovogo dizelâ [Mathematical model of local radiant heat transfer in marine diesel engine combustion chamber] // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2016, №3 (33), T.1, S. 146 – 151.
2. Rudnev B.I., Povalihina O.V. Lokal'nye optiko-geometriĉeskie harakteristiki i rezul'tiruûšie potoki izluĉeniâ v kamere sgoraniâ sudovogo dizelâ [Optical-geometrical data of radiation heat transfer in diesel combustion chamber] // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2018, №4(42), T.5, S. 90 – 94.
3. Rudnev B.I., Povalihina O.V. Rasĉetno-èksperimental'noe opredelenie parametrov izluĉeniâ plameni v kamere sgoraniâ sudovogo dizelâ [Calculation-experimental definition of radiation parameters of flame in marine diesel combustion chamber] // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2020, №4(50), T.1, S. 98 – 102.
4. GOST R ISO 3046-1-99. Dvigateli vnutrennego sgoraniâ poršnevye. Harakteristiki. Ĉast'1. Standartnye ishodnye usloviâ, ob"âvlennye mošnost', rashody topliva i smazoĉnogo masla. Metody ispytanij. [Internal combustion engines piston. Characteristics. Part 1. Standart initial conditions proclaim power, consumptions of fuel and lubricant oil. Methods of experiences] – Vved. 2001-01-01. M.: Izd-vo standartov, 1999, 23 s.
5. Vihert M.M., Kratko A.P., Rafal'kes I.S. i dr. Vliânie tipa raboĉego processa i režima raboty bystrohodnogo dizelâ na svojstva saži i otrabotavšie gazy [Influence type work process and regime of operation high speed diesel on propertyes of soot and exhaust gases] // Avtomobil'naâ promyšlennost', 1975, №10, S. 8 – 14.
6. Milliken R.K. Razmery, optiĉeskie svojstva i temperatura ĉastic saži [Sizes, optical propertyes and temperature particles of soot]// Izmerenie temperatur v ob'emah novoj tehniki. M.: Mir, 1965, S. 152 – 172.
7. Bakirov F.G., Zaharov V.M., Polešuk I.Z. i dr. Obrazovanie i vygoranie saži pri sžiganiî uglevodorodnyh topliv. [Formation and combustion of soot by combustion of hydrocarbons fuels] M.: Mašinstroenie, 1989, 128 s.
8. Carpenter K., Johnson J.H. Analysis of the physical characteristics of diesel particulate matter using transmission electron microscope techniques // SAE Preprints, 1979, № 790815, 17 p.
9. Mohammad Samy I., Borman G.L. Measurement of soot and flame temperature along three directions in the cylinder of a D.I. diesel // SAE Techn. Pap, Ser., 1991, №910728, P. 1 – 15.
10. Bloh A.G., Žuravlev Ū.A., Ryžkov L.N. Teploobmen izluĉeniem. Spravoĉnik. [Radiative heat transfer. Handbook] M.: Ènergoatomizdat, 1991, 432 s.
11. Zigel' R., Hauèll Dž. Teploobmen izluĉeniem. [Radiative heat transfer.] M.: Mir, 1975, 934 s.

12. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York. Academic Press, 2003, 822 p.
13. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Ocenki spektral'noj optičeskoj toľšiny plameni v kamere sgoraniâ sudovogo dizelâ [Estimation spectral optical thickness of flame in marine diesel combustion chamber] // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2020, №1(47), T.2, S. 91 – 94.
14. Šabrov N.N. Metod konečnyh èlementov v rasčetah teplovyh dvigatelej [Method final elements in calculation of thermal engines] L.: Mašinstroenie, 1983, 212 s.
15. Gavrušin S.S., Baryšnikova O.O., Boriskin O.F. Čislennyj analiz èlementov konstrukcii mašin i priborov. [Numerical analysis elements of constructions machines and apparatuses] M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.È. Baumana, 2014, 480 s.
16. Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Teploobmen i teplovye ispytaniâ materialov i konstrukcij aèrokosmičeskoj tehniki pri radiacionnom nagreve. [Heat transfer and thermal investigations of materials and constructions of aero cosmic technics by radiation heating] M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.È. Baumana, 2014, 396 s.
17. Dent J.C., Siluaman S.I. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection Diesel engine // SAE Preprints, 1977, № 770407, 26p.

#### 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

**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

**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

**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

Статья поступила в редакцию 11.12.2021; одобрена после рецензирования 21.01.2022, принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted 11.12.2021; approved after reviewing 21.01.2022; accepted for publication 21.02.2022.

Научная статья

УДК 542.78

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.011>

## Перспективы применения сжиженного природного газа на водном транспорте Санкт-Петербурга

А.В. Лобанов<sup>1</sup> Al.Lobanov@adm.gazprom.ru, Н.В. Першин<sup>1</sup> N.Pershin@adm.gazprom.ru,  
О.Л. Кускова<sup>2</sup> O\_Kuskova@vniigaz.gazprom.ru, И.С. Медведков<sup>2</sup> I\_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru  
<sup>1</sup>«Газпром», <sup>2</sup>«Газпром ВНИИГАЗ»

**Аннотация** В статье рассматривается вопрос о возможности и целесообразности перевода пассажирских судов, осуществляющие перевозки экскурсионно-прогулочными маршрутами по внутренним водным путям Санкт-Петербурга и в акватории Финского залива, на сжиженный природный газ. Отмечается, что несмотря на опыт создания пассажирского судна на СПГ «Чайка-СПГ», существуют препятствия к реализации проекта, основным из которых является отсутствие инфраструктуры по бункеровке судов такого класса. Кроме того, имеющаяся нормативная база по газотопливному судоходству и СПГ-бункеровке недостаточна для практического применения и требует доработки. Приводится сравнительный расчет экономической эффективности эксплуатации судов на СПГ. Высокая стоимость судов, связанная с высокой долей импортного судового комплектующего оборудования, а также с удорожанием проектов в связи с единичностью и индивидуальностью исполнения заказа, оказывает отрицательное влияние на экономическую эффективность проекта. Для реализации таких проектов необходимо государственное вмешательство – льготное кредитование, компенсация части стоимости судна, компенсация части накладных расходов – необходимые меры для привлечения судовладельцев.

**Ключевые слова:** водный транспорт, сжиженный природный газ, бункеровка, нормативные акты, бункеровочная инфраструктура СПГ.

**Для цитирования:** Лобанов А.В., Першин Н.В., Кускова О.Л., Медведков И.С. Перспективы применения сжиженного природного газа на водном транспорте Санкт-Петербурга, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 86—94

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.011>

## Prospects for the use of liquefied natural gas in the water transport of St. Petersburg

Alexey V. Lobanov<sup>1</sup> Al.Lobanov@adm.gazprom.ru, Nikita V. Pershin<sup>1</sup> N.Pershin@adm.gazprom.ru,  
Olga L. Kuskova<sup>2</sup> O\_Kuskova@vniigaz.gazprom.ru, Ilya S. Medvedkov<sup>2</sup> I\_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru  
<sup>1</sup>Gazprom PJSC, St. Petersburg, Russian Federation, <sup>2</sup>Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The article considers the question of the possibility and expediency of transferring passenger ships carrying out sightseeing and pleasure routes along the inland waterways of St. Petersburg and in the waters of the Gulf of Finland to liquefied natural gas. It is noted that despite the experience of creating a passenger vessel on LNG "Chaika-LNG", there are obstacles to the implementation of the project, the main of which is the lack of infrastructure for bunkering vessels of this class. In addition, the existing regulatory framework for gas-fuel shipping and LNG bunkering is insufficient for practical application and needs to be finalized. A comparative calculation of the economic efficiency of the operation of LNG vessels is given. The high cost of ships associated with a high proportion of imported ship components, as well as the rise in the cost of projects due to the uniqueness and individuality of the execution of the order, has a negative impact on the economic efficiency of the project. For the implementation of such projects, government intervention is necessary – preferential lending, compensation of part of the cost of the vessel, compensation of part of the overhead costs - the necessary measures to attract ship-owners.

**Keywords:** water transport, liquefied natural gas, bunkering, regulations, LNG bunkering infrastructure

**For citation:** Alexey V. Lobanov, Nikita V. Pershin, Olga L. Kuskova, Ilya S. Medvedkov, Prospects for the use of liquefied natural gas in the water transport of St. Petersburg, Marine intelligent technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 86—94

### Текущее состояние водного транспорта, курсирующего на внутренних водных путях Санкт-Петербурга и в акватории Финского залива

Северо-Западный регион РФ и Санкт-Петербург как крупнейший туристический центр в регионе обладают уникальным геополитическим положением и мощным туристско-рекреационным потенциалом, что создает уникальные условия для развития

внутреннего и въездного туризма. Особое место в туризме Санкт-Петербурга занимает водный (речной и морской) туризм. В Санкт-Петербурге и пригородах насчитывается 64 реки и 48 каналов. Общая протяженность водотоков 555,5 км, из них в целях судоходства используются 23 водных объекта общей протяженностью 104,168 км [1]

В настоящее время флот коммерческих перевозок пассажиров водным транспортом в Санкт-

Петербурге делится на четыре категории: скоростные пассажирские суда, осуществляющие перевозки по внутренним водным путям Российской Федерации и в Невской губе Финского залива; пассажирские суда, осуществляющие перевозки экскурсионно-прогулочными маршрутами по внутренним водным путям Российской Федерации и в Невской губе Финского залива; пассажирские суда, осуществляющие перевозки экскурсионно-прогулочными маршрутами по внутренним водным путям Российской Федерации, а также по водным объектам пригодным для судоходства, но не включенным в перечень внутренних водных путей Российской Федерации; маломерные суда, используемые в коммерческих целях, осуществляющие перевозки пассажиров по водным объектам.

На внутренних водных путях Санкт-Петербурга и в акватории Финского залива на 01.01.2021 курсировало 167 экскурсионно-прогулочных судов (табл.1).

Средний возраст флота, работающего на экскурсионно-прогулочных маршрутах, составляет 10 лет, средний возраст скоростных судов – 27 лет.

Развитие пассажирского флота в Санкт-Петербурге в основном происходит посредством модернизации и обновления существующих теплоходов. Из конструктивно новых теплоходов частными компаниями приобретаются однопалубные суда.

Всего в Санкт-Петербурге насчитывается около 100 туристических маршрутов. Основные крупные перевозчики осуществляют свою деятельность по 29 маршрутам, протяженность которых варьируется от 8 до 30 км.

Таблица 1

Основные виды пассажирских судов, эксплуатируемых на пригородных и экскурсионно-прогулочных маршрутах в Санкт-Петербурге

| Наименование | Проект          | Длина, м | Ширина, м | Осадка, м | Пассажиро-<br>вместимость, чел. | Скорость, км/ч | Класс |
|--------------|-----------------|----------|-----------|-----------|---------------------------------|----------------|-------|
| Метеор       | 342Э            | 34,6     | 9,5       | 2,35/1,2  | 116                             | 65             | Р     |
| Восход       | 352/03521       | 27,6     | 6,4       | 2,1/1,1   | 71                              | 65             | Р     |
| Москва       | Р51ЭА           | 38,2     | 6,5       | 1,18      | 225                             | 23             | Р     |
| Нева         | Р35             | 38,2     | 6,5       | 1,22      | 264                             | 24             | Р     |
| Фонтанка     | Р118            | 20,3     | 5,55      | 0,66      | 80                              | 12             | Р     |
| Фонтанка     | 82510           | 20,13    | 5,43      | 0,6       | 80                              | 17             | Р     |
| Фонтанка     | 82840,<br>82841 | 21,5     | 5,5       | 0,41      | 55                              | 15             | Р     |
| ПС           | 792/792А        | 18,38    | 4,26      | 0,60      | 50                              | 15             | Р,Л   |
| Ладожанка    | Ладожанка       | 16       | 3,6       | 0,55      | 40                              | 15             | Р     |
| КС-100М      | КС-100М         | 15,2     | 3,8       | 0,45      | 50                              | 28             | Р,Л   |
| Мойка        | 82500           | 14,68    | 3,75      | 0,66      | 70                              | 16             | Р     |

Для оценки потенциала производства и использования СПГ на речном транспорте Санкт-Петербурга необходимо задать ряд условий функционирования экскурсионно-прогулочных теплоходов в период навигации. Считается, что на речном транспорте наиболее высокая экономическая эффективность может быть достигнута при использовании СПГ для быстроходных судов на подводных крыльях (типа «Метеор») и на воздушной подушке (типа «Линда»), однако примеры перевода быстроходных судов на СПГ в настоящее время отсутствуют. Вследствие чего – основной критерий выбора судов для перевода на СПГ – наличие существующего аналога, которым стал двухпалубный пассажирский теплоход проекта 03622 «Чайка», изготовленный и выпущенный на воду в 2020 году АО «Зеленодольский завод имени А.М. Горького» (рис. 1, 2). Проект судна «Чайка» разработан в партнёрстве с ООО «КАМАЗ Вейчай», ООО «РариТЭК Инжиниринг», ООО «НПК «Ленпромавтоматика». Судовая энергетическая установка состоит из двух газовых двигателей по 258 кВт производства Weichai Power[2.3].

Основываясь на опыте строительства судна «Чайка-СПГ», аналогичную конструкцию имеют теплоходы класса «Москва» и «Нева» (табл. 2). Вследствие чего, их рассматривали в качестве потенциально возможных к переводу на СПГ. В настоящее время в акватории Невы курсируют 19

двухпалубных теплоходов класса «Москва» и «Нева», средний возраст судов составляет 41 год.



Рис. 1 Общий вид судна «Чайка»



Рис. 2 Криогенно-бортовая топливная система судна «Чайка»



Таблица 2

**Сравнение технических характеристик теплоходов класса «Москва»**

| Характеристики                                 | Проект Р-51Э          | Проект 03622 «Чайка»                                  |
|--|-----------------------|---|
| Длина  | 38,2 м                | 58,8 м  |
| Ширина   | 6,5 м                 | 10,8 м  |
| Высота борта                                   | 1,7 м                 | 2,5 м   |
| Высота надводная с заваленной мачтой           | 5,7 м                 | 5,2 м   |
| Водоизмещение с пассажирами и полными запасами | 109,9 т               | 420,0 т   |
| Пассажировместимость                           | 225 чел               | до 170 чел  |
| Экипаж (на вахте)                              | 3 чел                 | 3 чел   |
| Скорость с полными запасами на глубокой воде   | 23 км/ч               | 18 км/ч   |
| Мощность главного двигателя (ГД)               | 2х150 л. с.           | 2х350 л.с.  |
| Тип ГД   | ЗД6Н-150 (6ЧНСП15/18) | ГД 2х WP12C350-20NG, реверс-редуктор 2хDong-I DMT190H |
| Мощность генераторного агрегата                | 2х110 кВт             | 2х 100 кВт  |

При этом стоит отметить, что рассматривается только вариант нового строительства и замены старых дизельных теплоходов на новые суда на СПГ. Расчеты, проведенные специалистами АО «Зеленодольский завод имени А.М. Горького», показали, что реконструкция старых теплоходов с небольшим остаточным ресурсом, требующая достаточно больших вложений в переоборудование, экономически нецелесообразна.

Для определения этапности ввода судов на СПГ достижимый темп строительства судов был определен как 3 единицы в год.

На основании данных, представленных Комитетом по транспорту Правительства Санкт-Петербурга расход за навигацию одним теплоходом класса «Москва» составляет 32-38 тыс. литров дизельного топлива. Используя те же условия эксплуатации дизельного теплохода класса «Москва» в 2019 году, на основании расходных характеристик двигателей на теплоходе «Чайка-СПГ» был определен годовой расход СПГ, который составит 64,2-75,7 тонн. Таким образом, к 2030 г потребность в СПГ может составить 1200-1400 тонн в год с учетом сделанных допущений.

**Анализ нормативно-правовой базы, регулирующей применение СПГ в качестве моторного топлива на водном транспорте**

К основным нормативным документам, регулирующим применение СПГ на водном транспорте, можно отнести следующие документы:

- ГОСТ Р 55892-2013 Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Общие технические требования
- ГОСТ Р 59020-2020 Нефтяная и газовая промышленность. Грузовые операции и бункеровка сжиженным природным газом. Термины и определения
- ГОСТ Р 59021-2020 Нефтяная и газовая промышленность. Грузовые операции и бункеровка сжиженным природным газом. Общие требования
- ГОСТ Р 59022-2020 Нефтяная и газовая промышленность. Грузовые операции и бункеровка сжиженным природным газом. Оборудование причалов

- ГОСТ Р 57431-2017 (ИСО 16903:2015) Газ природный сжиженный. Общие характеристики (Переиздание)

- ГОСТ Р 57433-2017 Использование природного газа в качестве моторного топлива. Термины и определения (Переиздание) Извещение №6 о внесении изменений в Правила Российского Речного Регистра (утверждено приказом Российского Речного Регистра от 16.04.2018 № 25-п)

Анализ нормативной документации показал, что в Российской Федерации требования, предъявляемые к процедуре осуществления бункеровки, а также требования к бункеровочной инфраструктуре отличаются противоречивостью и недостаточностью.

Основная сложность, возникающая при имплементации требований, указанных в нормативных документах «Нефтяная и газовая промышленность. Грузовые операции и бункеровка сжиженным природным газом...» заключается в том, что их положения не предназначены для подтверждения на соответствие требованиям Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ. В этой связи перечисленные документы носят исключительно рекомендательный характер и объекты, спроектированные по представленным требованиям, потребуют разработки специальных технических условий (далее – СТУ), где на основании расчета рисков необходимо обосновать величины противопожарных разрывов и применяемых противопожарных мероприятий. Необходимость разработки указанного СТУ обусловлена отсутствием требований к объектам потребления СПГ, предназначенным для отгрузки топлива в речные и морские суда. Единственным документом в РФ, в котором приведены требования к объектам потребления СПГ и который применяется для целей Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ, является СП 326.1311500.2017 «Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности». Однако в п. 1.2 СП 326.1311500.2017 указано, что «Настоящий свод правил не распространяется на объекты, предназначенные для отгрузки СПГ в морские и речные суда». Разработка СТУ приведет к повышению стоимости и увеличению

сроков разработки проектной документации при создании бункеровочной инфраструктуры.

Другим важным обстоятельством при практическом применении указанных ранее национальных стандартов является то, что значительная часть положений и нормативных ссылок, распространяется только на морские порты и не учитывают специфики речного транспорта. В нормативных документах достаточно подробно описана работа стендеров, однако требования, приведенные к альтернативным заправочным устройствам и требования по обеспечению их нормального функционирования в условиях бункеровки речного транспорта с берега по схеме «автоцистерна – судно» (п. 9.3 ГОСТ Р 59021–2020, п. 6.10, 6.18 ГОСТ Р 59022–2020), не могут быть удовлетворены существующими образцами техники. Пост бункеровки СПГ, в том числе размещенный в составе передвижного бункеровщика, требует наличия сложной и дорогостоящей автоматики, контролирующей параметры, в том числе на борту бункеруемого судна. По этой причине следует заключить, что заправка речного транспорта передвижным бункеровщиком на практике возможно организовать только по схеме «автоцистерна – оборудование причала – стендер/бункеровочное устройство – судно» или коротко – по схеме «берег – судно» в соответствии с п. 6.6.2 ГОСТ Р 59021–2020. При необходимости и желании осуществить заправку судов по схеме «автоцистерна – судно» потребуются разработка специального бункеровщика, оснащенного всеми необходимыми устройствами и системами. При этом следует отметить, что «Минимальное расстояние между криогенной автоцистерной СПГ и станцией бункеровки СПГ газотопливного судна определяют исходя из необходимости обеспечения общего уровня безопасности (в том числе пожарной) и общего расположения портового и бункеровочного оборудования» (п. 6.3.1 ГОСТ Р 59021–2020), что опять говорит о необходимости разработки СТУ при подготовке площадок для размещения криогенных автоцистерн. В связи с вышесказанным существенно снижается ценность приведенных документов, поскольку проектирование любого элемента бункеровочной инфраструктуры потребует дополнительного анализа пожарных рисков, разработки компенсационных технических решений, варианты которых существуют в специальных нормативных документах, но действие, которых, не распространяются на рассматриваемые объекты.

Выполнение требований Российского Речного Регистра (РРР) осложняется тем обстоятельством, что далеко не все криогенное промышленное оборудование, пригодное для работы с СПГ, сертифицировано РРР, поскольку не удовлетворяет повышенным требованиям к вибростойкости, температурным диапазонам, коррозионной стойкости кожухов аппаратов и пр. В этой связи возникает необходимость гармонизации требований РРР и требований к имеющемуся общепромышленному

оборудованию, предназначенному для работы со сжиженным природным газом.

Следует отметить, что в настоящее время ООО «Газпромнефть Марин Бункер» совместно с АО «ЦНИИМФ» осуществляет разработку проекта свода правил «Типовое руководство по бункеровке СПГ в портах РФ». Данный документ призван решить проблемы, связанные с описанием порядка бункеровки водного транспорта сжиженным природным газом и вопросов обеспечения безопасности. Однако, как и все ранее разработанные документы, свод правил не предполагает его согласование в МЧС России и профильном техническом комитете по стандартизации, а значит, свод правил не может быть применен в целях подтверждения соответствия требованиям Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

В связи с вышесказанными существующими проблемами, возникающими при проектировании оборудования причалов и бункеровочных систем, необходимо скорейшее внесение изменений в действующие нормативные документы и разработка документов высокого уровня, которые будут предназначены для подтверждения соответствия требованиям № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [6].

#### **Предложения по организации бункеровочной инфраструктуры СПГ и логистики доставки СПГ**

Бункеровка судов возможна несколькими методами<sup>1</sup>: «автоцистерна – судно», «танк-контейнер – судно», «берег – судно», «судно – судно». Последний вариант бункеровки считается оптимальным, он позволяет сократить потери продукта и является более энергоэффективным, а также дает большую гибкость, исключая необходимость бункеруемому судну подходить к конкретному причалу. Судно-бункеровщик может обеспечивать логистически более гибкую, круглосуточную и круглогодичную бункеровку СПГ судов.

Преимуществом использования судна-бункеровщика СПГ, пришвартованного к борту принимающего судна, находящегося в порту или на якорной стоянке, является удаленность бункерных операций от грузовых причалов, что снижает их влияние на грузовые операции в порту и уменьшает последствия возможных аварий, связанных с использованием СПГ.

Существующие технологии бункеровки СПГ в основном сводятся к применению автомобильных криогенных цистерн. Автомобильные цистерны позволяют бункеровать судно с причала, не оборудованного терминалом СПГ [7].

Для осуществления бункеровки методом «автоцистерна-судно» необходим поиск специальных мест, на которых на длительное время может быть размещена автоцистерна и осуществлять бункеровку остановившегося у причала теплохода, не нарушая при этом правил

<sup>1</sup> ГОСТ Р 59021-2020 Нефтяная и газовая промышленность. Грузовые операции и бункеровка сжиженным природным газом. Общие требования.

пожарной безопасности, в частности наличие противопожарных разрывов. Вследствие чего, размещение криогенной автоцистерны вдоль набережных в пределах жилых массивов и исторических зон маловероятно. В свою очередь, наиболее подходящих к размещению бункеровщика рассматриваются территории портов.

При выборе площадки для размещения автоцистерны-бункеровщика на территории порта необходимо проведение специальных исследований, направленных на выполнение анализа пожарных рисков и разработку компенсационных технических мероприятий для обеспечения безопасности процесса бункеровки. Площадка, с размещенным бункеровщиком, выделяется в локальную зону и оборудуется инженерно-техническими средствами защиты и системой контроля и управления доступом для ограничения доступа на ее территорию третьих лиц, определяемая и утверждаемая властями порта.

При определении расположения бункеровочного судна в порту следует учитывать такие факторы, как близость пригодных водных путей, районов обработки и перегрузки опасных грузов, расстояние до служб аварийного реагирования, селитебной зоны, мест с высокой концентрацией населения и коммерческой деятельности [8].

На сегодняшний день рынок производства СПГ на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга является наиболее развитым по сравнению с другими регионами РФ. На территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга размещены несколько малотоннажных заводов по производству СПГ: КСПГ на АГНКС г. Кингисепп, КСПГ Псков, терминал по производству СПГ порт Высоцк (ЗАО «Криогаз») и КСПГ на АГНКС-8 Петергоф (ООО «Газпром газомоторное топливо»), среднетоннажный комплекс по производству, хранению и отгрузке сжиженного природного газа в районе КС «Портовая» (ООО «Газпром СПГ Портовая»). Предполагается дальнейшее развития сети малотоннажного производства и использования СПГ [6], [9]. При этом доставка СПГ из приведенных источников до места бункеровки автоцистерной является наиболее вероятным вариантом, так как производственные объекты оборудованы площадками слива-налива для перевалки СПГ в автоцистерны.

В качестве первого варианта целесообразно рассматривать поставку СПГ автотранспортом с комплекса на АГНКС Петродворец ООО «Газпром газомоторное топливо» или с завода «Криогаз-Высоцк» г. Выборг. Авторами статьи был проведен расчет поставок СПГ для обеспечения теплоходов бункеровочным топливом по годам. В результате расчетов определено, что для бункеровки трех судов достаточно одного метановоза объемом 17 куб. м с периодичностью поставки один раз в 6 суток, для бункеровки шести судов – один метановоз в 3 суток,

для двенадцати судов – потребуется ежедневная поставка СПГ.

В качестве второго варианта формирования бункеровочной инфраструктуры для заправки СПГ-теплоходов следует рассматривать бункеровку судов в акватории Финского залива с борта вновь построенного бункеровщика «Дмитрий Менделеев» (ООО «Газпромнефть Марин Бункер»). Бункеровщик предназначен для заправки грузовых и пассажирских судов сжиженным природным газом у причала или на рейде в порту. По информации ПАО «Газпром нефть», бункеровщик «Дмитрий Менделеев» проектировался под бункеровку для крупнотоннажных судов, и вопрос о технической возможности бункеровки маломерных судов требует дальнейшей проработки. В качестве источника СПГ по данному варианту целесообразно рассматривать Комплекс по производству, хранению и отгрузке СПГ в районе КС «Портовая» [10].

#### **Оценка перспектив и эффективности использования сжиженного природного газа (СПГ) в качестве моторного топлива на внутренних водных путях Санкт-Петербурга и в акватории Финского залива**

При расчете экономической эффективности сравнивать эксплуатацию существующих теплоходов класса «Москва-Нева» с теплоходами на СПГ не представляется возможным, вследствие того, что, не смотря на сопоставимый класс теплоходов, производительность судового оборудования различается в два раза, что значительно увеличивает эксплуатационные расходы, связанные с расходом и затратами на топливо. Поэтому расчет экономической эффективности был построен на принципе сравнения вариантов: вариант «ДТ» – приобретение такого же судна класса «Чайка» на дизельном топливе и вариант «СПГ» – приобретение судна «Чайка СПГ». При этом в обоих вариантах принимались одинаковые условия эксплуатации: маршруты, время эксплуатации, численность персонала, прочие расходы. Горизонт расчета вариантов – 20 лет. В варианте «СПГ» предусматривались капитальные затраты на приобретение теплоходов класса «Чайка СПГ», которые составляют 320 млн рублей за судно. В варианте «ДТ» принимались капитальные затраты на приобретение теплоходов класса «Чайка» с дизельными двигателями такой же мощности. Для определения стоимости аналогичного судна класса «Чайка» на ДТ было принято допущение, что разница в стоимости судна различается на величину стоимости криогенного и дополнительного газоиспользующего оборудования, что может составлять 10-30% от общей стоимости судна. В представленном ниже расчете стоимость судна в варианте «ДТ» принимается на 20% меньшей стоимости судна «Чайка СПГ». Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3

Исходные данные для расчета эффективности

| № п/п | Показатели   | Вариант "ДТ"                     | Вариант "СПГ" |
|-------|--|----------------------------------|---------------|
| 1     | Мощность ГД, кВт   | 258                              | 258           |
| 2     | Количество ГД на судне, ед.                                      | 2                                | 2             |
| 3     | Навигационный период, сут  | 219                              | 219           |
| 4     | Средняя продолжительность хода судна в сутки, часов              | 3,3                              | 3,3           |
| 5     | Суммарная продолжительность хода судна в навигационный период, ч | 657,0                            | 657,0         |
| 6     | Расход топлива, г/кВт·ч  | 198,0                            | 210,0         |
| 7     | Расход топлива, ед./ч  | 59,2 л (расчетное <sup>1</sup> ) | 53,1 кг       |
| 8     | Стоимость топлива  | 50,0 руб./л                      | 35,0 руб./кг  |
| 9     | Стоимость топлива с учетом 2-х ГД, руб./ч                        | 4409,7                           | 3719,1        |
| 10    | Расход топлива за навигацию                                      | 28 977,6 л                       | 34 906,4 кг   |
| 11    | Затраты на покупку топлива, руб.                                 | 1 448 589,9                      | 1 221 724,4   |
| 12    | Стоимость судна, млн руб. (без учета НДС)                        | 256,0                            | 320,0         |
| 13    | Налог на имущество, %  | 2,0                              | 2,0           |
| 14    | Налог на прибыль, %  | 20,0                             | 20,0          |
| 15    | Норма дисконтирования, %   | 10,0                             | 10,0          |
| 16    | Срок полезного использования судна, лет                          | 20,0                             | 20,0          |

Выручка определялась за счет разницы в затратах на топливо между вариантами, дополнительные капитальные вложения обусловлены разницей в стоимости теплоходов.

Проведенные расчеты дисконтированных денежных потоков показывают, что, несмотря на принятые допущения и исходные условия, проект имеет отрицательную эффективность:

Выручка, млн руб. – 522,2  
 Капитальные вложения, млн руб. – 1216  
 Чистый доход от проекта (ЧД), млн руб. – минус 872,1  
 Чистый дисконтированный доход от проекта (ЧДД), млн руб. – минус 823,1  
 Внутренняя норма доходности, – 11,4  
 Срок окупаемости, лет – более 20  
 Дисконтируемый срок окупаемости, лет – более 20

Также были проведены расчеты на чувствительность показателей проекта в зависимости от изменения следующих параметров: увеличение продолжительности хода судна в сутки (часов);

изменение разницы в стоимости теплоходов;  
 изменение разницы в стоимости топлива.

Проведенные расчеты показывают, что эффективность проекта может быть повышена за

счет увеличения продолжительности работы судна, которая, в свою очередь, увеличивает расход топлива, а соответственно и выручку за счет разницы в стоимости топлив. Сокращение разницы в величине капитальных затрат также положительно влияет на эффективность проекта, как и увеличение разрыва в цене между ДТ и СПГ.

Помимо высоких требований к факторам, обуславливающим эффективность проекта, успешная его реализация требует привлечения существенных ресурсов. Так, для обновления 19 судов, к 2030 году необходимы инвестиции в размере 6 млрд. рублей в течение 7 лет. Возможным финансовым механизмом для реализации такого крупного проекта является использование договоров финансового лизинга с использованием мер государственной поддержки. Государственная поддержка осуществляется в виде субсидий на возмещение части затрат на уплату процентов по кредитам при закупке гражданских судов и лизинговых платежей по договорам лизинга. Для судовладельцев получение судна в лизинг – возможный вариант приобретения судов на СПГ.

В частности, заказчиком строительства судна «Чайка СПГ» выступила Государственная транспортная лизинговая компания (ГТЛК) в рамках программ лизинга с государственным

<sup>1</sup> Пересчитано через плотность дизельного топлива марки Л (летнее) по ГОСТ 305-2013, равной 863,4 кг/м<sup>3</sup>.

софинансированием. В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 1825<sup>1</sup> ГТЛК предоставлены субсидии из федерального бюджета в 2020 году в объеме 272 млн. рублей.

Операторами по обновлению флота выступают две российские лизинговые компании: Государственная транспортная лизинговая компания и АО «Машпромлизинг». Они предлагают технику по льготной ставке в 2,5% годовых. Срок договора лизинга на речное судно может составлять до 15 лет [11].

Также с 2017 года действует мера господдержки – судовой утилизационный грант (Постановление Правительства Российской Федерации от 27.04.2017 № 502 (ред. от 11.03.2021) «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета российским организациям на возмещение части затрат на приобретение (строительство) новых гражданских судов взамен судов, сданных на утилизацию»). Это единовременная выплата российской судоходной компании при утилизации старого флота и заказе на отечественной верфи нового судна [12].

Во многих странах существуют меры прямой и косвенной государственной поддержки, которые, так или иначе, компенсируют до 20% стоимости судна.

Единственный способ привлечь судовладельцев – предоставить конкурентоспособное предложение по стоимости и срокам поставки судов.

### Выводы

Главным препятствием на пути применения СПГ на водном транспорте является отсутствие инфраструктуры по бункеровке судов СПГ.

Отсутствуют криогенные передвижные бункеровщики, оборудованные по требованиям нормативных документов, отсутствуют образцы оборудования причалов, отвечающих требованиям бункеровки СПГ.

В настоящее время имеющаяся нормативная база по газотопливному судоходству и СПГ-бункеровке недостаточна для практического применения и требует доработки.

Необходима разработка типового технологического регламента бункеровки СПГ в портах РФ (в том числе речных), включающего требования к местам бункеровки, системам и средствам автоматизации процесса, средствам связи, системам аварийного отключения и отсоединения, руководство по безопасности при бункеровке СПГ, меры по обеспечению противопожарной безопасности, меры

по предотвращению утечек газа и пр. При разработке типового регламента необходимо учитывать характеристики СПГ как топлива, существующий опыт реализации пилотных проектов бункеровки СПГ и использования СПГ на транспорте, объединяющих производство и потребление СПГ.

Реализация проекта по использованию СПГ на внутренних водных путях Санкт-Петербурга и в акватории Финского залива должна предусматривать синхронизированное развитие парка газовых судов и газотранспортной и сервисной инфраструктуры. Необходимо согласовывать инфраструктурные решения, начиная от завода, откуда СПГ перевозится к месту бункеровки, завершая узлом отгрузки и криогенной бортовой топливной системой судна. Согласование инфраструктурных решений позволит снизить потери при осуществлении технологических операций, а также сократить издержки за счет оптимизации логистики. Такое согласование возможно только при реализации подобных проектов силами единого оператора.

Необходимо сокращать капитальные затраты в строительство судов. Высокая стоимость судна связана с высокой долей импортного судового комплектующего оборудования. А также с удорожанием проектов в связи с единичностью и индивидуальностью исполнения заказа.

Необходимо повышать эффективность криогенного и газоиспользующего оборудования. Отмечается преимущество в эффективности дизельных двигателей по сравнению с аналогами, использующих газовое топливо. НИОКР, направленные на разработку оборудования причалов и передвижных бункеровщиков, КБТС судов и эффективных газовых двигателей силами отечественных производителей, потенциально позволит улучшить привлекательность использования СПГ на речном транспорте.

Сравнительные расчеты приобретения судна на дизельном топливе и СПГ с последующей эксплуатацией в одинаковых условиях показали, что на эффективность проекта оказывает влияние увеличение продолжительности работы судна, которая, в свою очередь, увеличивает расход топлива, и, соответственно, экономию - за счет разницы в стоимости топлив.

Во всем мире судостроительный бизнес устроен таким образом, что для его развития необходимо государственное вмешательство. Льготное кредитование, компенсация части стоимости судна, компенсация части накладных расходов – необходимые меры для привлечения судовладельцев.

### Литература

1. Фасхутдинов Р. Российские реки: взгляд из правительственных окон. Санкт-Петербург [Электронный ресурс]: [https://www.korabel.ru/news/comments/rossiyskie\\_reki\\_vzglyad\\_iz\\_pravitelstvennyh\\_okon\\_sankt-peterburg.html](https://www.korabel.ru/news/comments/rossiyskie_reki_vzglyad_iz_pravitelstvennyh_okon_sankt-peterburg.html) (дата обращения 14.01.2022).
2. Теплоход «Чайка» [Электронный ресурс] <https://kamaz-weichai.ru/projects/Motor-ship-Chaika/> (дата обращения 14.01.2022).

<sup>1</sup> Постановление Правительства Российской Федерации от 25.12.2019 № 1825 «О предоставлении в 2019 и 2021 годах субсидий из федерального бюджета публичному акционерному обществу "Государственная транспортная

лизинговая компания" на осуществление капитальных вложений в приобретение объектов недвижимого имущества - гражданских судов водного транспорта».

3. Компания Эмерсон оснастила первое российское прогулочное судно на СПГ-топливе «Чайка» системой дистанционного автоматизированного управления газовых двигательных установок <https://www.emerson.ru/ru-ru/news/automation/21-02-dau-marex-Ing-ru> (дата обращения 18.01.2022).
4. Прогулочно-экскурсионное судно для местных линий «Чайка-СПГ» [Электронный ресурс] <https://sk-akbars.ru/products/grazhdanskoe-sudostroenie/passazhirskie-suda/progulochno-ekskursionnoe-sudno-dlya-mestnykh-linij-chajka-spg/> (дата обращения 18.01.2022).
5. Как устроен первый российский теплоход на СПГ «Чайка» проекта 03622 [Электронный ресурс] <https://paluba.media/news/13540> (дата обращения 18.01.2022).
6. План мероприятий ("дорожная карта") по развитию рынка малотоннажного сжиженного природного газа и газомоторного топлива в Российской Федерации на период до 2025 года: Распоряжение Правительства РФ от 13.02.2021 № 350-р // Собрание законодательства РФ, 22.02.2021, № 8 (часть II), - Ст. 1432.
7. Костылев И.И., Коняев Д.В. Бункеровка как фактор сдерживания применения газового топлива на судах// Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. № 5 (39). с. 134-144.
8. СПГ-бункеровка. О необходимости актуализации системы российских стандартов. Деловой журнал «Neftegaz.RU» [Электронный ресурс] <https://magazine.neftgaz.ru/articles/transportirovka/449997-spg-bunkerovka-o-neobkhodimosti-aktualizatsii-sistemy-rossiyskikh-standartov/> (дата обращения 14.01.2022).
9. Методические подходы к формированию программ малотоннажного производства и использования сжиженного природного газа. Горбачев С.П., Дроздов Ю.В. и др./ Научно-технический сборник «Вести газовой науки», №1 (29), Москва, 2017, С.227-240.
10. СПГ-бункеровщик «Газпром нефти» прошел ходовые испытания [Электронный ресурс]: Сайт ООО «Газпромнефть Марин Бункер» <https://marinebunker.gazprom-neft.ru/press-center/news/75044/> (дата обращения 14.01.2022).
11. Мистахов Р. Без серийного заказа судостроители не смогут дать хорошую цену. [Электронный ресурс]: Сайт «Реальное Время» <https://realnoevremya.ru/articles/207951-glava-sk-ak-bars-dal-intervyu-po-povodu-stroitelstva-rechnyh-sudov> (дата обращения 14.01.2022).
12. Импульс к стабильному спросу. «ПортНьюс» 2020 №2 [Электронный ресурс]: <https://portnews.ru/magazine/a108/> (дата обращения 14.01.2022).

#### References

1. Faskhutdinov R. Russian rivers: a view from government windows. Saint Petersburg [Electronic resource]: [https://www.korabel.ru/news/comments/rossiyskie\\_reki\\_vzglyad\\_iz\\_pravitelstvennyh\\_okon\\_sankt-peterburg.html](https://www.korabel.ru/news/comments/rossiyskie_reki_vzglyad_iz_pravitelstvennyh_okon_sankt-peterburg.html) (accessed 14.01.2022).
2. The ship "Chaika" [Electronic resource] <https://kamaz-weichai.ru/projects/Motor-ship-Chaika/> / (accessed 14.01.2022).
3. The Emerson Company equipped the first Russian LNG-fueled pleasure vessel "Chaika" with a remote automated control system for gas propulsion systems <https://www.emerson.ru/ru-ru/news/automation/21-02-dau-marex-Ing-ru> (accessed 18.01.2022).
4. Pleasure-excursion vessel for local lines "Chaika-LNG" [Electronic resource] <https://sk-akbars.ru/products/grazhdanskoe-sudostroenie/passazhirskie-suda/progulochno-ekskursionnoe-sudno-dlya-mestnykh-linij-chajka-spg/> / (accessed 18.01.2022).
5. How does the first Russian ship LNG Чайка project 03622 [Electronic resource] <https://paluba.media/news/13540> (accessed 18.01.2022).
6. the Plan of measures ("road map") for the development of the market of low-tonnage liquefied natural gas and natural gas fuel in the Russian Federation for the period up to 2025: the Decree of the RF Government from 13.02.2021 № 350-R // meeting of the legislation of the Russian Federation, 22.02.2021, No. 8 (part II) - PT. 1432.
7. Kostylev I.I., Konyaev D.V. Bunkering as a deterrent to the use of gas fuel on ships// Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of the Sea and River Fleet. 2016. No. 5 (39). pp. 134-144.
8. LNG bunkering. On the need to update the system of Russian standards. Business Magazine "Neftegaz.RU" [Electronic resource] <https://magazine.neftgaz.ru/articles/transportirovka/449997-spg-bunkerovka-o-neobkhodimosti-aktualizatsii-sistemy-rossiyskikh-standartov/> / (accessed 14.01.2022).
9. Methodological approaches to the formation of programs for low-tonnage production and use of liquefied natural gas. Gorbachev S. P., Drozdov, Y. V. et al./ Scientific and technical collection "Vesti gas science", №1 (29), Moscow, 2017, Pp. 227 240.
10. LNG bunker "Gazprom oil" completed sea trials [Electronic resource]: the Website of LLC "Gazpromneft marine Bunker" <https://marinebunker.gazprom-neft.ru/press-center/news/75044/> / (accessed 14.01.2022).
11. Mistakhov R. Without a serial order, shipbuilders will not be able to give a good price. [Electronic resource]: Real Time website <https://realnoevremya.ru/articles/207951-glava-sk-ak-bars-dal-intervyu-po-povodu-stroitelstva-rechnyh-sudov> (accessed 14.01.2022).
12. Impulse to stable demand. PortNews 2020 No.2 [Electronic resource]: <https://portnews.ru/magazine/a108/> / (accessed 14.01.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Алексей Валериевич Лобанов**, начальник отдела ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург, 196105, Московский пр-т, д.156, лит. А, БЦ "Электро" к. 818, Al.Lobanov@adm.gazprom.ru

**Никита Вячеславович Першин**, главный морской инспектор, ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург, 196105, Московский пр-т, д.156, лит. А, БЦ "Электро" к. 817, N.Pershin@adm.gazprom.ru

**Ольга Леонидовна Кускова**, заместитель начальника лаборатории ООО «Газпром ВНИИГАЗ 142717, пос. Развилка, с.п. Развилковское, Ленинский р-н, МО, Проектируемый проезд №5537, вл.15, стр.1, O\_Kuskova@vniigaz.gazprom.ru

**Илья Сергеевич Медведков**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ, 142717, пос. Развилка, с.п. Развилковское, Ленинский р-н, МО, Проектируемый проезд №5537, вл.15, стр.1, I\_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru

**Alexey Valeryevich Lobanov**, Head of the Department, Gazprom PJSC, Moskovsky ave., 156, lit. a, business center "Electro" k. 818, 196105, St. Petersburg, Russian Federation, Al.Lobanov@adm.gazprom.ru

**Nikita Vyacheslavovich Pershin**, Chief Marine Inspector, Gazprom PJSC, Moskovsky ave., 156, lit. a, business center "Electro" k. 817, 196105, St. Petersburg, Russian Federation, N.Pershin@adm.gazprom.ru

**Olga Leonidovna Kuskova**, Deputy Head Of The Laboratory, Gazprom VNIIGAZ LLC, Projected passage No. 5537, property 15, building 1., settlement Razvilka, s.p. Razvilkovskoe, Leninsky district, Moscow Region, 142717, Russian Federation, O\_Kuskova@vniigaz.gazprom.ru

**Ilya Sergeevich Medvedkov**, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Gazprom VNIIGAZ LLC, Projected passage No. 5537, property 15, building 1., settlement Razvilka, s.p. Razvilkovskoe, Leninsky district, Moscow Region, 142717, Russian Federation, I\_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 21.02.2022.

Научная статья

УДК 621. 436. 001. 63

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.012>

## Моделирование и расчетный эксперимент с целью снижения минимальной частоты вращения судового дизеля под нагрузкой и при холостом ходе

Г.Б. Горелик<sup>1</sup> ggorelik@mail.ru, В.Н. Даничкин<sup>2</sup> danichkin@msun.ru,  
О.Н. Мозолев<sup>1</sup> oleg19793@yandex.ru, А.Ю. Чистяков<sup>3</sup> glucker2000@mail.ru

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, <sup>2</sup>Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, <sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В статье приведены результаты расчетного эксперимента по моделированию возможности улучшения процессов топливоподачи судового дизеля с целью снижения минимальных устойчивых оборотов при работе под нагрузкой и холостом ходе путем отключения половины цилиндров с помощью оригинального устройства и при использовании водотопливной эмульсии. В расчетном эксперименте путем воздействия периодическими колебаниями определенной частоты и амплитуды на рейку насоса высокого давления дизеля удалось обеспечить отключение половины цилиндров из работы. При этом имитировалось восстановление режима нагрузки путем задания координаты рейки с помощью соответствующего идентификатора математической модели топливной аппаратуры. Работа системы автоматического регулирования частоты была обеспечена без изменения каких либо настроек системы. Оценка качества работы топливной аппаратуры дизеля на малых режимах проведена на базе моделирования процессов топливоподачи с использованием критерия стабильности последовательных циклов впрыскивания, что позволило расширить рабочий диапазон дизеля в сторону малых режимов нагрузок и, тем самым, обеспечить требования действующего ГОСТ 10150-88 с улучшением качества управления топливной аппаратурой и повысить эффективность использования дизеля в реальных условиях его эксплуатации. Показано, что совмещение расчетного эксперимента с моделированием процессов топливоподачи позволяет решить сложную техническую задачу по расширению рабочего диапазона дизеля в части обеспечения возможности снижения минимальных устойчивых оборотов холостого хода и под нагрузкой.

**Ключевые слова:** межцикловая нестабильность, моделирование, процессы топливоподачи, водотопливная эмульсия, частичные режимы, отключение цилиндров, последовательные циклы впрыскивания, критерий стабильности.

**Для цитирования:** Горелик Г.Б., Даничкин В.Н., Мозолев О.Н., Чистяков А.Ю. Моделирование и расчетный эксперимент с целью снижения минимальной частоты вращения судового дизеля под нагрузкой и при холостом ходе Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 95—106

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.012>

## Modeling and computational experiment in order to reduce the minimum rotational speed of a marine diesel engine at load and idle

Gennadiy B. Gorelik<sup>1</sup> ggorelik@mail.ru, Vitaliy N. Danichkin<sup>2</sup>: danichkin@msun.ru,

Oleg N. Mozolev<sup>1</sup> oleg19793@yandex.ru, Alexandr Yu. Chistyakov<sup>3</sup> glucker2000@mail.ru

<sup>1</sup>Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation, <sup>2</sup>Maritime University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation, <sup>3</sup>St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article presents the results of a computational experiment to simulate the possibility of improving the fuel supply processes of a marine diesel engine in order to reduce the minimum stable rotation speed when operating under load and idling by disconnecting half of the cylinders using an original device and using a water-fuel emulsion. In a calculated experiment, by the action of periodic oscillations of a certain frequency and amplitude on the diesel high-pressure pump rail, it was possible to ensure that half of the cylinders were disconnected from operation. In this case, the load mode restoration was simulated by specifying the rail coordinate using the corresponding identifier of a fuel equipment mathematical model. The operation of automatic frequency control system was ensured without changing any system settings. Evaluation the operation quality of a diesel fuel equipment at low modes was carried out on the modeling basis of a fuel supply processes using the stability criterion of successive injection cycles, which made it possible to expand the diesel engine operating range towards low load modes and, thereby, to meet the requirements of the current GOST 10150-88 with improved fuel equipment control quality and to increase the efficiency of using a diesel engine in real operation conditions of its. It is shown that the combination of the computational experiment with the fuel supply processes simulation allows solving a complex technical problem of expanding the operating range of a diesel engine in terms of ensuring the possibility of reducing the minimum stable idle speed and under load.

**Keywords:** inter-cycle instability, modeling, fuel supply processes, water-fuel emulsion, partial modes, cylinder shutdown, sequential injection cycles, stability criterion.



**For citation: Gennadiy B. Gorelik, Vitaliy N. Danichkin, Oleg N. Mozolev, Alexandr Yu. Chistyakov, Modeling and computational experiment in order to reduce the minimum rotational speed of a marine diesel engine at load and idle Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 95—106**

### Введение

Трудоемкие и дорогостоящие экспериментальные исследования в настоящее время все чаще заменяют расчетным экспериментом при условии наличия надежной и достоверной математической модели реального объекта. В данном случае речь идет о модернизации системы автоматического регулирования дизеля (САРч) с целью снижения минимальных устойчивых оборотов на режимах малых подач и частот вращения на примере семейства дизелей ряда ЧН 18/22, типовая структурная схема которой включает в себя топливный насос высокого давления (ТНВД), что представлено на рис. 1. Топливная система двигателя надежно описывается математической моделью процессов топливоподачи и позволяет выполнять анализ работы дизеля на режимах малых подач топлива и частот вращения [1, 2]. Как показала практика, возникающие периодические колебания частоты вращения при малых нагрузках и пониженной частоте вращения ухудшают качество работы дизеля, не позволяя расширить рабочий диапазон снизу. При этом, не удается выполнить требования действующего ГОСТ 10150-88 и обеспечить устойчивое снижение минимально устойчивой частоты вращения холостого хода и при работе под нагрузкой.

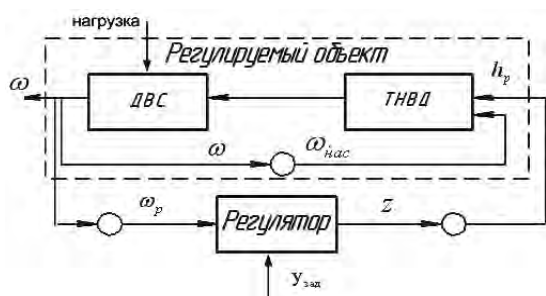


Рис. 1. Структурная схема САРч дизелей семейства Ч и ЧН18/22

Поэтому важной и актуальной задачей является создание модернизированной САРч (МСАРч) для повышения качества работы двигателя на режимах малых нагрузок и снижение минимально устойчивых оборотов под нагрузкой и холостом ходе при расширении области применения для всей номенклатуры используемых в эксплуатации двигателей.

Проведение экспериментального исследования крайне сложно, требует больших затрат времени, наличия силовой стеновой установки, разработки устройства для обеспечения качества работы на малых режимах, организацию поиска оптимальных режимов и т.п. Поэтому предлагается следующий алгоритм действий: выбор МСАРч для обеспечения целей исследования, реализация способа управления работой двигателя, управление математической моделью топливной аппаратуры [3], обработка и анализ процессов топливоподачи,

выработка рекомендаций в соответствие с поставленной задачей исследования.

### Предлагаемая модернизированная САРч (МСАРч) для улучшения качества работы дизелей на режимах малых подач топлива и частот вращения

Схема предлагаемой МСАРч для управления работой двигателя при режимах малых подач и минимально устойчивых оборотах под нагрузкой и холостого хода (рис. 2) позволяет решить поставленную задачу. Модернизированная САРч имеет дополнительные элементы управления, но основа САРч при этом сохраняется: это дизель, регулятор частоты вращения и ТНВД.

МСАРч судового дизеля состоит из следующих элементов: дизель 1 с маховиком 3; автоматический регулятор частоты вращения 10 с выходным рычагом 11; орган топливоподачи ТНВД 7 с рейкой 8; блок управления 13; генератор колебаний электрического тока 12 с формирователем сигнала требуемой для решения поставленной задачи частоты и амплитуды 12; исполнительный механизм (ИМ) в виде электрического соленоида 9 с подвижным якорем 2, расположенным на рейке ТНВД; датчики угла поворота коленчатого вала 5 и положения органа топливоподачи рейки 6 (при этом датчик угла поворота коленчатого вала 5 снабжен двумя отметчиками угла поворота, установленными на маховике через 180° п.к.в. для 2-х тактного двигателя или одним отметчиком – для 4-х тактного, а датчик положения органа топливоподачи 6 снабжен отметчиком положения органа топливоподачи, срабатывающим при снижении нагрузки менее 30%); блок управления 13; источник питания 14.

Блок управления и генератор колебаний электрического тока электрически соединены между собой и включены в цепь источника питания постоянного тока, причем сигналы от датчиков положения органа топливоподачи 6 и угла поворота коленчатого вала 5 поступают на вход блока управления 13, выход которого связан со входом генератора колебаний электрического тока 12, а выход последнего электрически связан с исполнительным механизмом в виде электрического соленоида 9, бесконтактно установленном на органе топливоподачи (ТНВД) 7 с рейкой 8.

МСАРч (рис. 2) работает следующим образом. При снижении нагрузки ниже 30% по сигналу датчика 6 блок управления 13 с формирователем требуемой частоты обеспечивает команду запуска для генератора 12 знакопеременных колебаний электрического тока требуемой для работы частоты, которые через исполнительный механизм 9 придают колебательное движение рейке органа топливоподачи 8 с заданной частотой и амплитудой, согласно описанию МСАРч, дополнительно к основному сигналу от автоматического регулятора скорости 10, определяющему скоростной режим двигателя 1.

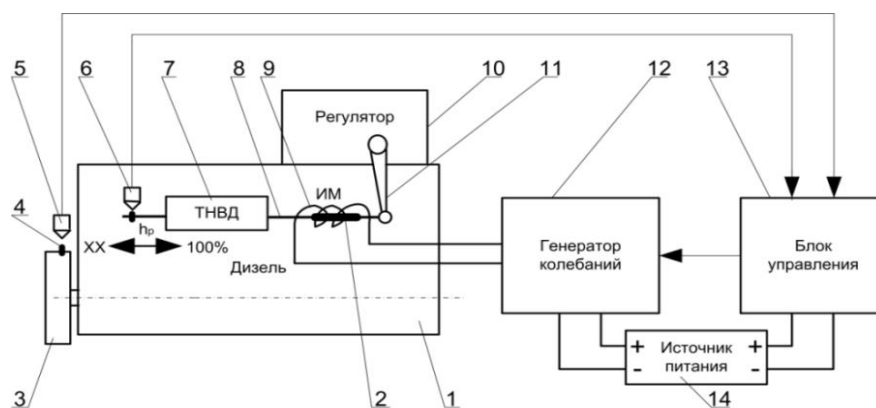


Рис. 2. Схема предлагаемого устройства для отключения части цилиндров

Регулятор 10 обеспечивает среднее положение рейки для заданного режима работы. Датчик угла поворота 5 через блок управления 13 формирует фазовое положение сигнала генератора колебаний 12 электрического тока по отношению к выбранному номеру цилиндра.

Для оценки работы топливной аппаратуры в расчетном эксперименте используется математическая модель (ММ) процессов топливоподачи, разработанная на кафедре «Двигателей внутреннего сгорания» ТОГУ проф. Г.Б. Горелик, адекватность которой доказана в многочисленных и уникальных экспериментах, когда подтверждались глубинные процессы в топливной системе, например, разрывы сплошности [1].

Погрешности измерений быстроменяющихся динамических процессов топливоподачи при этом не превышают 5–7% для близноминимальных режимов, для режимов малых подач и оборотов – 7–9%. При этом достоинством исследования на базе ММ является повторяемость результатов для любого момента времени, тогда как эксперимент всякий раз повторно не повторяется, особенно на режимах малых подач и оборотов.

Режим работы задается путем воздействия на координату задания регулятора, который автоматически при работе исполнительного устройства корректирует восстановление частоты вращения дизеля.

Последняя задается соответствующим идентификатором частоты вращения ММ, а режим работы установкой координаты положения рейки ТНВД.

#### Возможные способы решения поставленной задачи

Подобные задачи в двигателестроении обеспечивались путем отключения части цилиндров из работы. Так, например, известно применение на дизелях типа Д100 устройства для выключения части цилиндров при переходе на режим холостого хода. Безусловно, недостатком используемого способа является усложнение топливной системы двигателя в виде дополнительных элементов (электропневматический вентиль, пневмомеханизм, тяги, возвратная пружина, дополнительный контакт, реле скорости). При этом выключению подлежат одни и те же цилиндры двигателя, что обуславливает их больший износ по сравнению с не отключаемыми цилиндрами. Не решается другая и более

значительная задача, связанная с обеспечением частичных режимов нагружения (от холостого хода до  $\approx 25\text{--}30\%$  нагрузки, на которых из-за периодических колебаний процессов топливоподачи возрастает нестабильность частоты вращения дизеля, не позволяющая снизить минимальные обороты коленчатого вала под нагрузкой и на режиме холостого хода хотя бы в пределах требований ГОСТ 10150-88). При этом не обеспечивается и снижение частоты вращения холостого хода, так как настройка минимально устойчивых оборотов холостого хода сохраняется прежней, что не в полной мере решает поставленную задачу улучшения качества работы на малых режимах. Аналогичная задача стоит и перед стационарными дизелями, когда из-за периодической нестабильности процессов впрыскивания на режимах, меньших 30% нагрузки, одиночная и параллельная работа становится неудовлетворительной.

Применялись и другие топливные системы, например, с электронно-управляемым кольцевым нагнетательным клапаном. Подобное решение так же имеет ряд недостатков: значительное усложнение системы управления, появляется ряд дополнительных элементов, что существенно снижает надежность работы, а сам нагнетательный клапан не обеспечивает качественное протекание рабочего процесса топливоподачи в части разгрузки трубопровода высокого давления и, особенно, в конечной фазе впрыскивания на близноминимальных режимах, что способствует появлению повторных впрыскиваний. Использование подобного нагнетательного клапана в линии высокого давления нарушает гидравлическую идентичность по секциям и приводит к высокой неравномерности распределения подач по секциям и циклам. Это устройство также не обеспечивает снижение минимально-устойчивых оборотов под нагрузкой и холостом ходе.

Недостатки подобных способов управления:

- усложнение системы управления режимами, на которых производится выбег и разгон двигателя, когда он работает на режимах динамического холостого хода;
- снижение надежности из-за последовательного присоединения устройств и работы многочисленных датчиков положения;
- подобные устройства не обеспечивают качество управления, а при забросах органа управления топливоподачей, снижается эффективность

рабочего процесса двигателя из-за резко выраженных динамических бросков нагрузки;

- не обеспечиваются минимально устойчивые обороты под нагрузкой и холостом ходе, управление происходит на явно выраженных переходных режимах между выбегом и разгоном (на так называемых режимах динамического холостого хода);

- не обеспечивается снижение минимально устойчивых оборотов холостого хода;

- в работе находятся все цилиндры двигателя, поэтому не обеспечивается экономия ресурса цилиндро-поршневой группы, более того, на явно выраженных динамических режимах работы ухудшаются условия смазывания, происходит ударная выборка зазоров с усилением износных процессов [5–7];

- управление производится только при пониженных частотах вращения, вне поля рассматриваемых режимов остаются режимы малых нагрузок, когда из-за неудовлетворительной работы топливной аппаратуры ухудшаются топливная экономичность, возрастают выбросы вредных для окружающей среды продуктов сгорания, возрастает неравномерность вращения вала двигателя и т. п.

Решение поставленной задачи достигается за счет применения предложенной МСАРЧ для управления работой двигателя на режимах малых подач и минимально устойчивых оборотов под нагрузкой и холостом ходе (см. рис. 2). Для этого создается колебательное воздействие на орган топливоподачи при снижении нагрузки до значений, меньших 30% от номинальной. По сигналу датчика положения органа топливоподачи с помощью исполнительного механизма на него подается

(дополнительно и независимо к воздействию от автоматического регулятора скорости) сигнал от блока управления с формирователем в виде знакопеременных колебаний электрического тока определенной амплитуды и частоты, синхронизированный при помощи датчика угла поворота коленчатого вала с его угловым положением.

### Реализация МСАРЧ для управления работой двигателя на базе расчетного эксперимента

Реализация МСАРЧ для управления работой двигателя на режимах малых подач и минимально устойчивых оборотов под нагрузкой и холостого хода показана на рис. 3. За счет отключения ряда цилиндров увеличивается активный ход рейки, что повышает качество впрыскивания и стабильность последовательных циклов топливоподачи [1, 2]. Активный ход корректируется при изменении соответствующего идентификатора ММ.

Фазовое смещение подбирается при доводке устройства. При этом имеется в виду, что запаздывание в диапазоне от минимально-устойчивых оборотов под нагрузкой и до режима холостого хода практически сохраняется одинаковым, что существенно упрощает настройку. Отметчики угла поворота коленчатого вала (см. рис. 2) 4 могут быть выполнены в виде известных в практике штифтов на поверхности маховика 3 под индуктивные датчики, каковым и является датчик 5. Запуск блока управления происходит со смещением сигнала от этого датчика, поэтому практически отключение половины цилиндров происходит с одинаковой вероятностью в процессе эксплуатации.

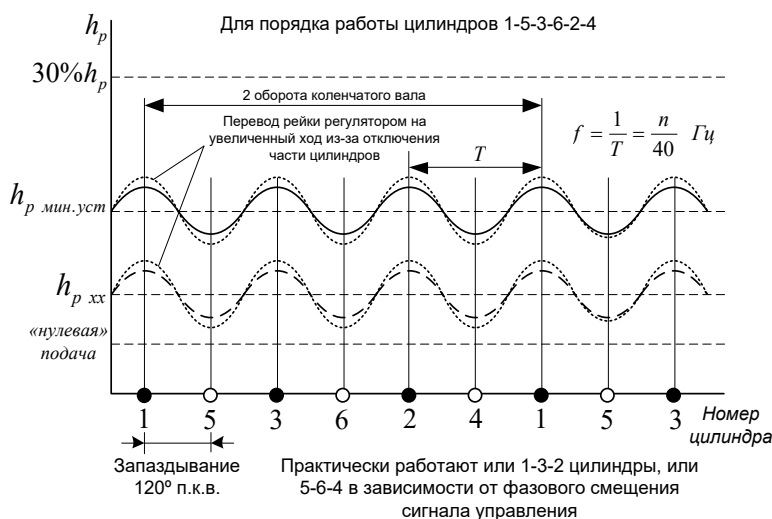


Рис. 3. Принцип реализации способа отключения части цилиндров

Для 4-х тактного двигателя, как было сказано ранее, используется один и тот же отметчик положения коленчатого вала, тогда как для 2-х тактного — два. Устройство работает в автоматическом режиме, обеспечивая комфортные условия работы обслуживающего персонала. При изменении режима работы (нагрузка выходит за пределы режима малых подач) блок управления

отключает генератор колебаний и САРЧ обеспечивает дизелю стандартный режим работы.

Например, для 4-х тактного шестицилиндрового двигателя задание с помощью блока управления с формирователем требуемой частоты через генератор синусоидальных колебаний периодических перемещений органа топливоподачи (рейки), приводящих ее в колебательный режим с помощью исполнительного механизма (ИМ) в виде

бесконтактно установленного на рейке электрического соленоида с частотой  $f = \frac{n}{40}$  Гц

(здесь  $n$  – частота вращения коленчатого вала, об/мин) и с такой настройкой фазового сдвига по отношению к первому цилиндру, чтобы максимум амплитуды соответствовал этому цилиндру. Очевидно, что в цилиндрах 1, 3 и 2 будет происходить рабочий процесс при повышенном ходе рейки, а цилиндры 5, 6 и 4 практически будут отключены (см. рис. 3) при положении рейки  $h_{p_{мин\ уст}}$ ). Аналогично обеспечивается режим при

положении рейки  $h_{p_{xx}}$ . Главное, что работа части секций происходит при увеличенном активном ходе плунжера, при этом снижается межцикловая нестабильность, а индикаторные кпд цилиндров существенно повышается. Именно в расчетном эксперименте возможно отладить МСАРч в части оптимального запаздывания максимума подъема рейки ТНВД, что сложно выполнимо при настройке системы на моторном стенде. Здесь нами установлено незначительное влияние угла запаздывания коленчатого вала на процессы впрыскивания.

Пунктиром (см. рис. 3) показан процесс увеличения амплитуды хода рейки из-за того, что автоматический регулятор скорости восстанавливает заданный скоростной режим, увеличивая ход рейки, так как половина цилиндров практически не работает. Зато оставшиеся в работе цилиндры при большей подаче топлива работают устойчиво (значения критерия устойчивости  $X$  не превышают 1,2-1,3) и с более высокими показателями рабочего процесса (топливная экономичность, меньшая неравномерность вращения). При соответствующей настройке МСАРч становится возможным снижение минимально-устойчивых оборотов под нагрузкой и холостом ходе.

Варьируя амплитудой колебаний рейки, экспериментально можно достичь полного отключения половины цилиндров. Решить данную задачу экспериментально чрезвычайно сложно, что требует большого времени испытаний. Необходимо отработка схемы, обеспечивающей колебания рейки. Главное, неизвестно влияние МСАРч на процессы топливоподачи и качество ее работы.

Так как цикл работы совершается за 2 оборота вала, то всякий раз при выходе на режим, меньший 30%, датчик угла поворота коленчатого вала, срабатывая от отметчика угла поворота как генератор случайных чисел, будет вводить в работу или цилиндры 1–3–2, или 5–6–4. Этим и обеспечивается равноценное в процессе эксплуатации отключение половины цилиндров, поэтому последние будут иметь одинаковый износ в процессе работы. В расчетном эксперименте возможна оптимальная настройка МСАРч.

Для двухтактного двигателя для обеспечения вывода из работы половины цилиндров необходимо устанавливать два отметчика угла поворота вала со смещением 180° п.к.в. (или половина оборота вала).

Аналогично возможен выбор задания оптимальных частот колебаний рейки для двигателей с другим количеством цилиндров, углом заклинивания колен коленчатого вала и тактностью рабочего процесса. Поэтому моделирование позволяет провести оптимизацию предлагаемой системы с достижением наилучшего результата в кратчайшие сроки.

**Результаты моделирования процессов топливоподачи на режимах малых подач и анализ возможности снижения минимальных оборотов под нагрузкой и холостом ходе для судового дизеля**

Результаты обработки режимов работы топливной аппаратуры при внедрении предлагаемой МСАРч сведены в таблицу.

Таблица

Результаты расчетного эксперимента при работе судового дизеля

| Параметры работы дизеля | Тип топлива | Режимы работы дизеля по винтовой характеристике при минимальных установившихся оборотах: |   |                 |   |                              |   |                 |   |
|-------------------------|-------------|--|---|-----------------|---|------------------------------|---|-----------------|---|
|                         |             | под нагрузкой  |   |                 |   | холостого хода               |   |                 |   |
|                         |             | Работают все цилиндры  |   |                 |   | половина цилиндров отключена |   |                 |   |
|                         |             | По ГОСТ10150-88  | Минимально возможный (предполагаемый) режим | По ГОСТ10150-88 | Минимально возможный (предполагаемый) режим | По ГОСТ10150-88              | Минимально возможный (предполагаемый) режим | По ГОСТ10150-88 | Минимально возможный (предполагаемый) режим |
| Номер варианта          |             | 1  | 2   | 3               | 4   | 5                            | 6   | 7               | 8   |
| $P_e$ , кВт             |             | 20   | 18-19                                       | -               | -   | 20                           | 18-19                                       | -               | -   |
| $n$ , мин <sup>-1</sup> |             | 225  | 200   | 300             | 250   | 225                          | 160   | 300             | 220   |
| $P_{max}$ , МПа         |             | 5,8  | 5,8   | 5,8             | 5,8   | 5,8                          | 5,8   | 5,8             | 5,8   |
| $g_{ц.}$ , г/цикл       | ДТ          | 0,135  | 0,101                                       | 0,037           | 0,025                                       | 0,270                        | 0,202                                       | 0,074           | 0,050                                       |
|                         | ВТЭ         | 0,174  | 0,131                                       | 0,047           | 0,033                                       | 0,348                        | 0,262                                       | 0,094           | 0,066                                       |
| $h_w$ , см              | ДТ          | 0,541  | 0,521                                       | 0,469           | 0,457                                       | 0,680                        | 0,615                                       | 0,493           | 0,488                                       |
|                         | ВТЭ         | 0,561  | 0,5411                                      | 0,478           | 0,472                                       | 0,722                        | 0,658                                       | 0,523           | 0,510                                       |
| $P_{ост}$ , МПа         | ДТ          | -9,55  | -7,79                                       | -6,24           | -6,36                                       | -11,57                       | -12,10                                      | -6,265          | -8,123                                      |
|                         | ВТЭ         | -7,41  | -5,1  | -4,59           | 0,36  | -8,636                       | -9,373                                      | -4,976          | -3,340                                      |

|                               |     |         |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|-----|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $P_{н\max}$ , МПа             | ДТ  | 25,7    | 25,1   | 25     | 21,4   | 25,8   | 22,8   | 27,0   | 23,3   |
|                               | ВТЭ | 24,4    | 27,3   | 24,4   | 25,7   | 24,3   | 23,9   | 29,0   | 26,7   |
| $P_{к\max}$ , МПа             | ДТ  | 31,5    | 28,8   | 32,1   | 29,7   | 34,2   | 29,1   | 32,6   | 27,7   |
|                               | ВТЭ | 27,6    | 28,3   | 29,3   | 27,3   | 31     | 29,4   | 30,8   | 27,6   |
| $P_{ф\max}$ , МПа             | ДТ  | 28,5    | 25,5   | 28,4   | 27,3   | 29,0   | 25,7   | 28,8   | 27,1   |
|                               | ВТЭ | 27,1    | 25,5   | 27,8   | 23,7   | 27,7   | 26,5   | 28,1   | 25,1   |
| $P_{интегр}$ , МПа            | ДТ  | 17,4    | 18,9   | 15,8   | 17,3   | 16,8   | 18,6   | 15,8   | 18,6   |
|                               | ВТЭ | 18,5    | 19,6   | 18,1   | 20,7   | 16,8   | 17,3   | 18,0   | 19,6   |
| $V_{иг}$ , см/с               | ДТ  | 113,2   | 34,6   | 41,3   | 22,4   | 79,8   | 20,1   | 4,26   | 16,6   |
|                               | ВТЭ | 36,8    | 29,9   | 8,23   | 20,2   | 41,5   | 12,4   | 57,4   | 6,2    |
| $V_k$ , см <sup>3</sup> /цикл | ДТ  | 0,174   | 0,126  | 0,0428 | 0,0222 | 0,3362 | 0,2529 | 0,0977 | 0,0664 |
|                               | ВТЭ | 0,1962  | 0,1536 | 0,0541 | 0,0377 | 0,3962 | 0,3028 | 0,1219 | 0,0748 |
| $V_f$ , см <sup>3</sup> /цикл | ДТ  | 0,1742  | 0,1243 | 0,0393 | 0,0307 | 0,3363 | 0,2511 | 0,0978 | 0,0667 |
|                               | ВТЭ | 0,1925  | 0,1533 | 0,0544 | 0,0374 | 0,3965 | 0,2965 | 0,1189 | 0,0714 |
| $\Phi_{вп}$ , град.           | ДТ  | 3,04    | 2,84   | 1,06   | 0,92   | 5,55   | 4,15   | 2,31   | 1,84   |
|                               | ВТЭ | 3,65    | 2,88   | 2,05   | 1,83   | 6,92   | 4,26   | 2,91   | 2,29   |
| $X$ , отн. ед.                | ДТ  | 1,77    | 1,84   | 1,96   | 1,9-2  | 0,19   | 0,93   | 1,01   | 1,21   |
|                               | ВТЭ | 1,9...2 | 1,11   | 0,407  | 0,630  | 1,34   | 0,8    | 1,77   | 0,62   |

Приняты следующие обозначения:  $P_e$  – эффективная мощность дизеля;  $n$  – частота вращения коленчатого вала;  $P_{\max}$  – максимальное давление сгорания;  $h_w$  – ход плунжера насоса высокого давления до начала отсечки (активный ход плунжера);  $P_{ост}$  – (условное) остаточное давление в ТВД установившегося режима после внесения возмущения (после 12 циклов впрыскивания);  $P_{н\max}$  – максимальное давление установившегося режима в штуцере ТНВД;  $P_{к\max}$  – максимальное давление установившегося режима в месте установки датчика давления в ТВД;  $P_{ф\max}$  – максимальное давление установившегося режима в объеме распылителя форсунки;  $P_{интегр}$  – среднее интегральное давление установившегося режима в форсунке, определяющее качество распыливания;  $V_{иг}$  – скорость посадки иглы распылителя на седло, определяющая работоспособность распылителя;  $V_k$  – объемная подача топлива через нагнетательный клапан насоса;  $V_f$  – объемная подача топлива через распылитель;  $\Phi_{вп}$  – продолжительность основного впрыскивания;  $X$  – критерий стабильности процессов топливоподачи, позволяющий оценить устойчивость впрыскивания в последовательных циклах.

Здесь и далее по тексту введены следующие обозначения показателей и параметров впрыскивания:  $f_o$  – площадь проходного сечения наполнительных и отсечных окон;  $P_k$  – давление в месте установки датчика давления в ТВД;  $P'_n$  – давление в штуцере ТНВД;  $P_f$  – давление в объеме распылителя форсунки;  $y$  – высота подъема нагнетательного клапана;  $z$  – высота поема иглы распылителя;  $n_{мин\ уст}$  – минимальная устойчивая частота вращения под нагрузкой;  $n_{мин\ хх}$  – минимальная устойчивая частота вращения холостого хода.

Рассматривалась возможность расширения рабочего диапазона стабильных процессов топливоподачи для снижения минимальных частот вращения коленчатого вала под нагрузкой и холостого хода. Параллельно выполнялся анализ использования водотопливных эмульсий для выполнения той же задачи. Согласно ранее выполненным исследованиям [3] критерий  $X$  показывает затрудненную возможность осуществления режимов минимально устойчивых оборотов под нагрузкой  $n_{мин\ уст}$  и минимальных

оборотов холостого хода  $n_{мин\ хх}$  (рис. 4–7). Для контроля качества работы топливной аппаратуры выполняется моделирование последовательных циклов, в нашем случае 3. Это позволяет визуально оценить нестабильность последовательных циклов впрыскивания. Критерий  $X$  дает количественную характеристику.

Следовательно, необходимо проверить возможность поиска предполагаемого режима с помощью выключения половины цилиндров из работы. Из таблицы видно, что при работе на ДТ значения критерия  $X$  располагаются близко к границе устойчивости процессов топливоподачи. Поэтому затруднительно обеспечить требования ГОСТ 10150-88.

При применении же ВТЭ имеются возможности обеспечить требования стандарта при относительно более высоких параметрах впрыскивания. Их оптимизация может быть осуществлена на основе методов вариационного исчисления [5, 6, 7].

Характер протекания параметров впрыскивания для работы на режимах малых подач и частот вращения коленчатого вала дизеля практически близок как при работе на ВТЭ, так и при работе на ДТ, тем не менее согласно критерия  $X$  устойчивость режимов выше при работе на ВТЭ.

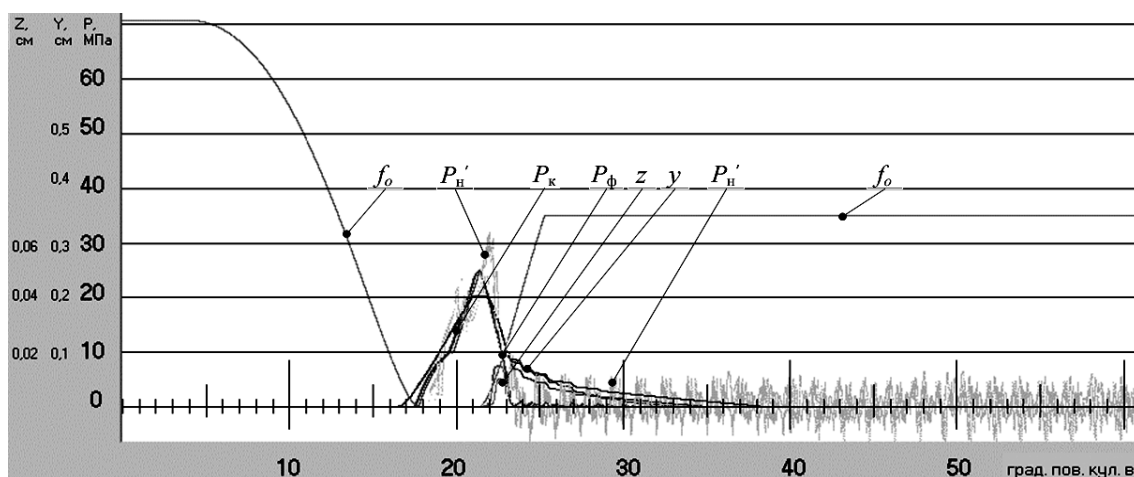


Рис. 4. Работа на ДТ при  $n_{мин хх}$  (3 наложенных последовательных цикла без отключения цилиндров)

На диаграмме (см. рис. 4) отчетливо наблюдаются периодические колебания процессов топливоподачи. Критерий стабильности  $X$  имеет величину 1,9-2. Именно это не позволяет работу дизеля на режиме минимально устойчивых оборотах

холостого хода. Поэтому в эксплуатации вынуждены повышать частоту вращения. При этом ухудшается топливная экономичность, сокращается моторесурс дизеля.

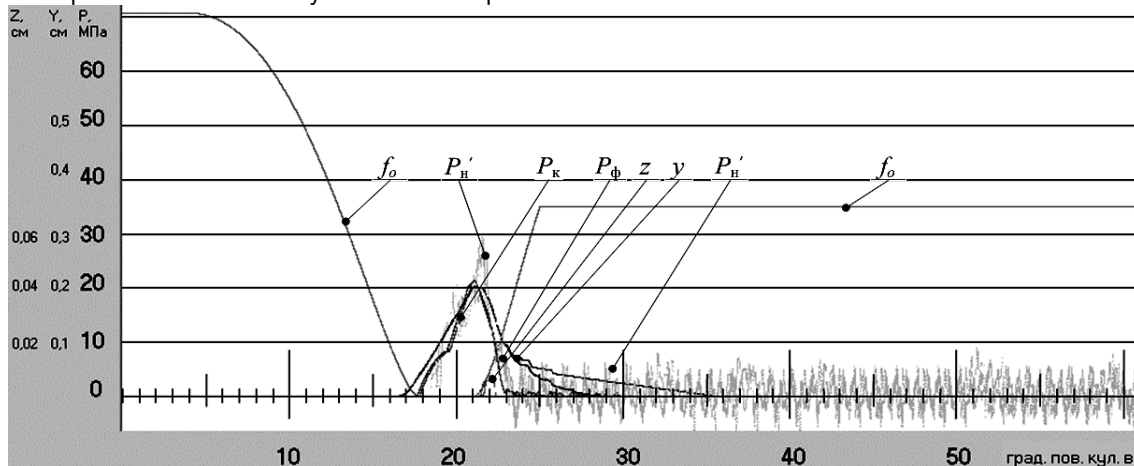


Рис. 5. Работа на ДТ при  $n_{мин хх}$  «Предполагаемый» режим без отключения цилиндров (3 наложенных последовательных цикла)

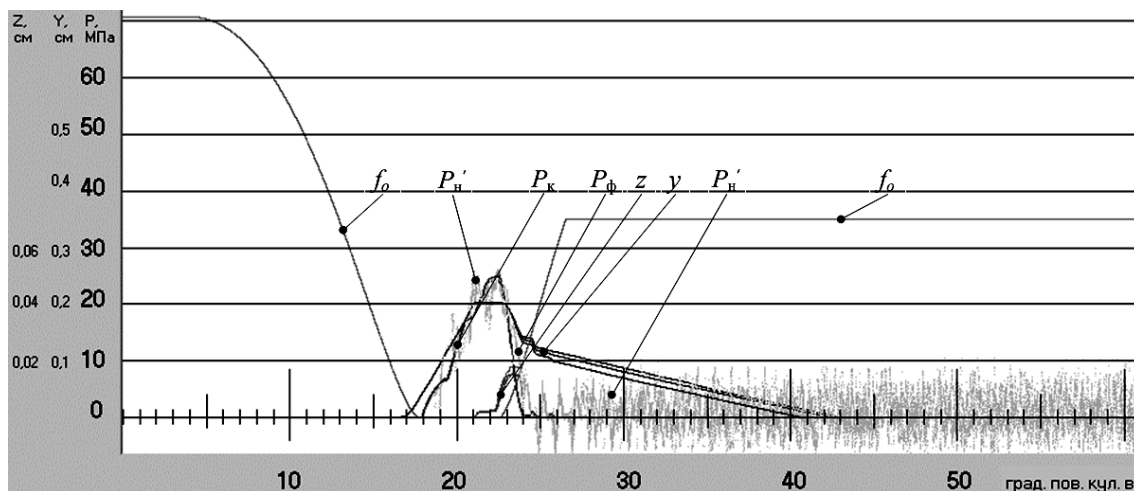


Рис. 6. Работа дизеля на ДТ при  $n_{мин уст}$  под нагрузкой «Предполагаемый режим» (3 наложенных последовательных цикла без отключения цилиндров)

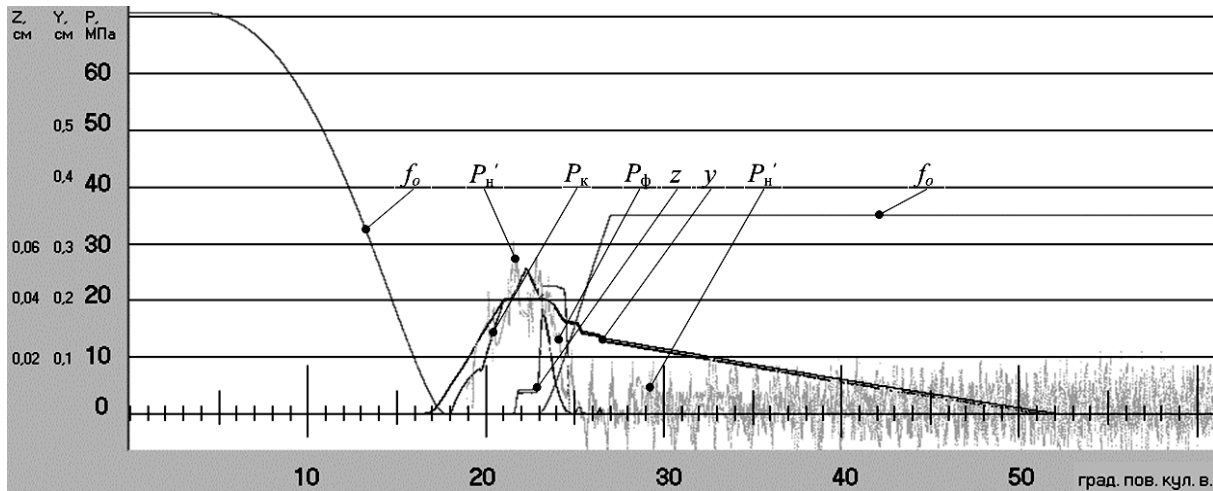


Рис.7. Работа дизеля на ДТ при  $n_{мин\ уст}$  под нагрузкой

(3 наложенных последовательных цикла без отключения цилиндров)

Следовательно, имеется возможность расширения рабочего диапазона снизу и достижения требуемых ГОСТ 10150-88 минимально возможных частот вращения.

Просматривается некоторый разброс линий, в частности, подъем иглы распылителя. Значения критерия X для режимов (см. рис. 4–6) соответственно составляют 1,77, 1,84, 1,96 и 1,95. Не реально обеспечить устойчивую работу дизеля. Для визуального контроля качества процессов топливopодачи в отдельных случаях проводилось наложение последовательных циклов впрыскивания. Для стабилизации остаточного давления с целью

количественной оценки параметров впрыскивания проводились расчеты двенадцати последовательных циклов впрыскивания.

Именно поэтому требования ГОСТ 10150-88 не выполняются и большинство выпускаемых в РФ дизелей не обеспечивают требования стандарта, по этой причине двигатели (судовые, тепловозные и транспортные) работают, как правило, при повышенных оборотах. При этом снижается топливная экономичность, а рыбопромысловые суда ухудшают свои технические характеристики при работе на трал.

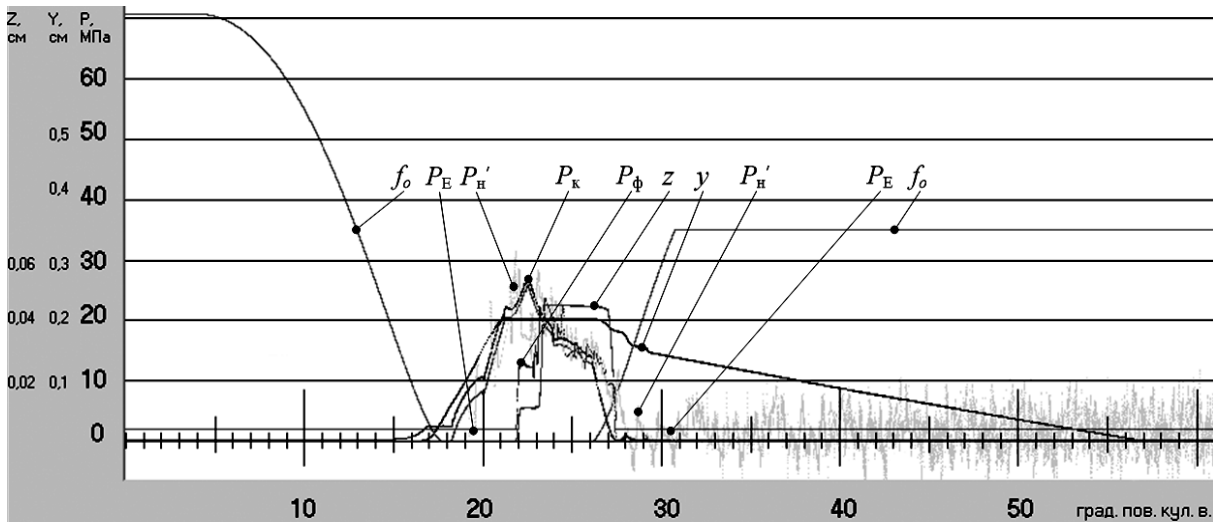


Рис.8. Работа дизеля на ДТ при  $n_{мин\ уст}$  под нагрузкой с отключением половины цилиндров

(3 наложенных последовательных цикла)

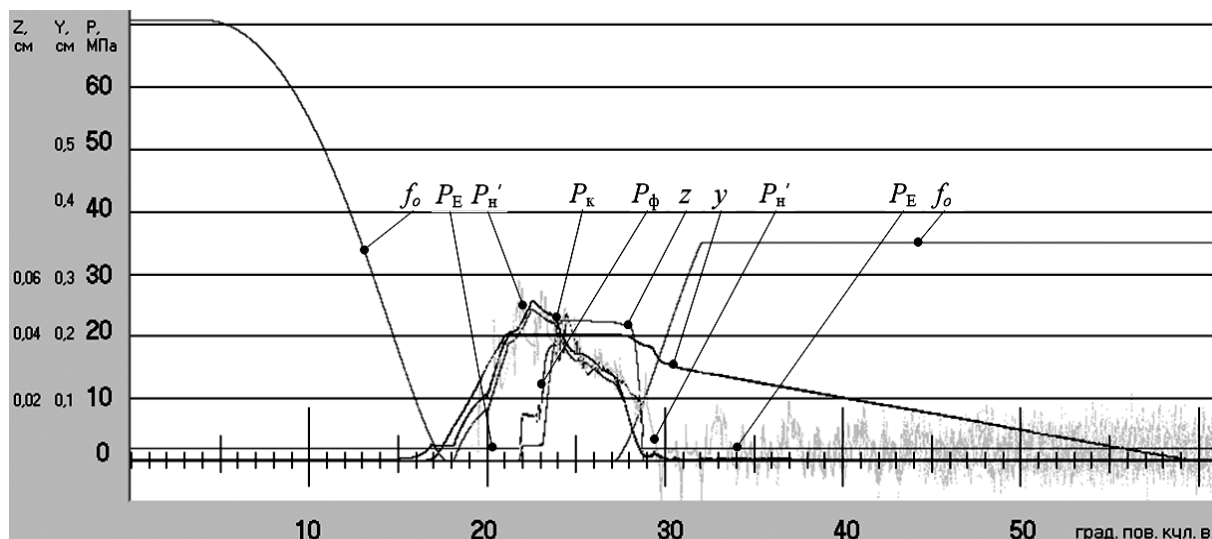


Рис.9. Работа дизеля на ВТЭ при  $n_{мин\ уст}$  под нагрузкой с отключением половины цилиндров (3 наложенных последовательных цикла)

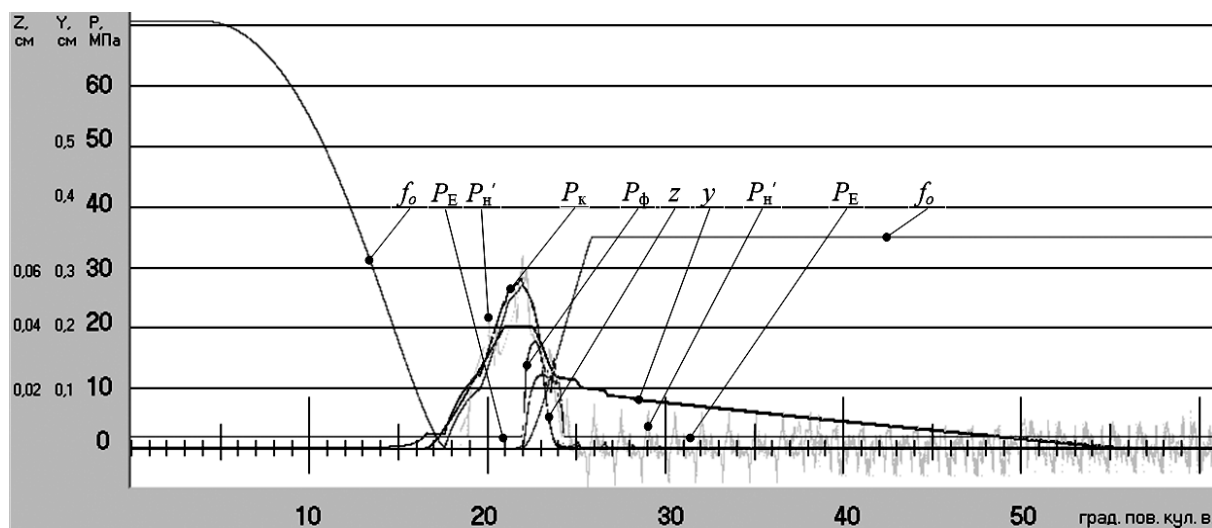


Рис.10. Работа дизеля на ДТ при  $n_{мин\ хх}$  с отключением половины цилиндров (3 наложенных последовательных цикла)

При отключении половины цилиндров (рис. 8–12) условия работы радикально меняются. Процессы впрыскивания проходят при практически удвоенной подаче топлива. Межцикловая нестабильность в последовательных циклах исчезает, что приводит к повышению качества работы, «предполагаемые» режимы протекают при более высоких давлениях впрыскивания при сокращении продолжительности подачи топлива с уменьшением доли топлива, подаваемого за период посадки иглы распылителя. И здесь удается обеспечить снижение минимальной частоты вращения как при работе под нагрузкой, так и на режиме холостого хода (см. таблицу). Таким образом, отключение части цилиндров позволяет не

только улучшить параметры впрыскивания, но и обеспечить на «предполагаемых» режимах требования ГОСТ 10150-88.

Эта задача важна для дизельного моторостроения, ее решение может обеспечить повышение экономичности работы дизелей, улучшения их экологических характеристик, решает задачу ремонтпригодности, снижения износа трибосопряжений топливной аппаратуры и повышения моторесурса дизелей [4, 6, 7]. Рассматриваемые режимы работы с отключением половины цилиндров при использовании ВТЭ дают более значимый результат.



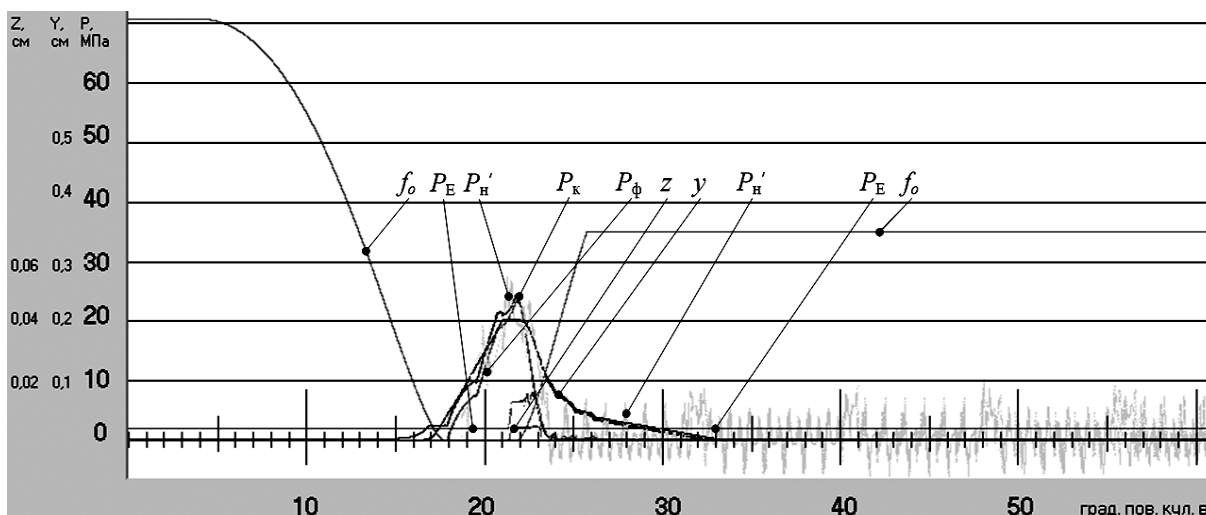


Рис.11. Работа дизеля на ДТ при  $n_{мин хх}$ , «Предполагаемый режим» с отключением половины цилиндров (3 наложенных последовательных цикла)

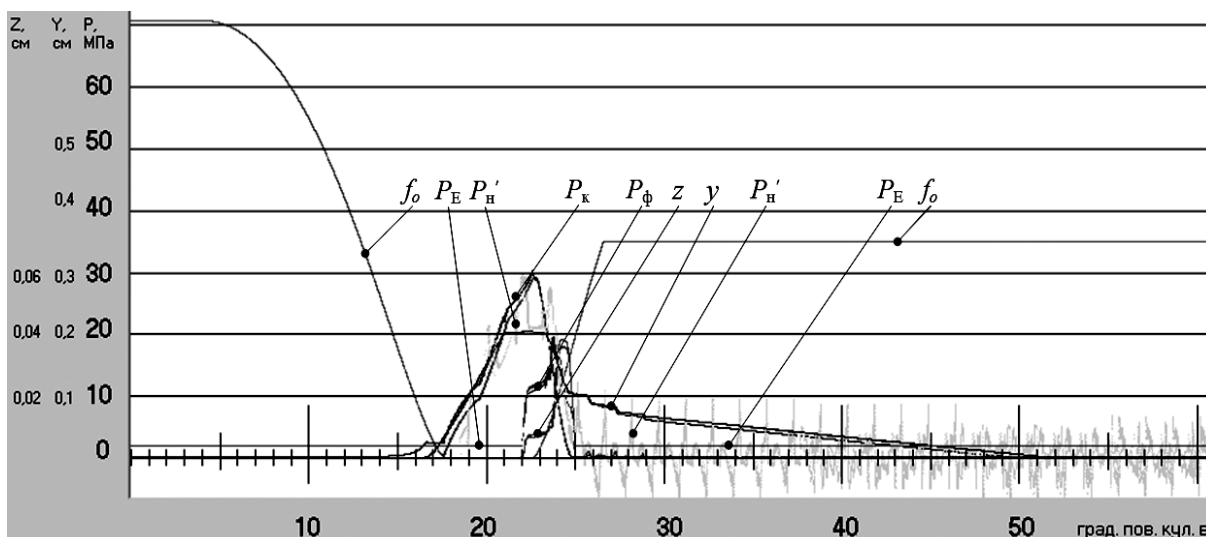


Рис.12. Работа дизеля на ВТЭ при  $n_{мин хх}$  с отключением цилиндров (3 наложенных последовательных цикла)

Таким образом, очевидна эффективность предложенного МСАРЧ для отключения половины цилиндров. Это итог так называемого расчетного эксперимента с использованием математической модели топливной аппаратуры, при этом возможна оптимизация системы, настройка ее на получение наилучшего эффекта. Это позволяет сократить время создания реальной системы автоматического регулирования дизеля, достичь важного народнохозяйственного результата.

### Заключение

1. Предлагаемый способ может быть реализован как при производстве новых двигателей внутреннего сгорания, так и при модернизации находящихся в эксплуатации. Улучшение качества работы на режимах малых подач и холостого хода, повышает эффективность применения не только в транспортных двигателях, но и главных судовых, стационарных, тепловозных и промышленного назначения и обеспечивает выполнение требований

ГОСТ 10150-88 при работе на режимах малых подач и частот вращения.

2. Показана реальная возможность улучшения качества процессов топливоподачи при применении предлагаемой МСАРЧ посредством отключения половины цилиндров. Это позволит выйти на так называемый «предполагаемый» режим со снижением значений минимально-устойчивых оборотов под нагрузкой и холостом ходе.

3. Использование датчиков положения органа топливоподачи и угла поворота коленчатого вала двигателя совместно с блоком управления и генератором колебаний электрического тока позволяют автоматизировать процесс управления при малых нагрузках и холостом ходе, сохраняя при этом функции автоматического регулятора скорости по обеспечению минимально устойчивых оборотов под нагрузкой и холостом ходе. Более того, позволяет снизить минимально устойчивые обороты под нагрузкой и холостого хода при соответствующей настройке САРЧ вращения в соответствие с требованиями действующего стандарта

ГОСТ 10150-88 и даже ниже, что обеспечивает расширение рабочего диапазона подач в сторону уменьшения. Это предопределяет высокое качество работы двигателей и повышает показатели их экономичности и надежности.

4. Применение предлагаемой МСАРЧ позволяет расчетным путем с использованием моделирования выйти на решение важной народнохозяйственной задачи, улучшить управление двигателем на

режимах малых нагрузок и холостом ходе и повысить эффективность использования двигателя в реальных условиях его эксплуатации.

5. Анализа расчетного исследования на базе разработанной математической модели позволяет обеспечить модернизацию САРЧ с выдачей рекомендаций в части улучшения качества работы дизелей на режимах малых подач топлива и пониженных частотах вращения.

#### Литература

1. Горелик Г. Б. Процессы топливоподачи в дизелях при работе на долевых и переходных режимах. Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2003. 247 с.
2. Горелик Г. Б. «Перетекание» электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов и обеспечение качества режимов малых нагрузок. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. 250 с.
3. Чистяков А. Ю., Горелик Г. Б., Мозолев О. Н. Особенности процессов топливоподачи в дизелях при использовании водотопливной эмульсии в качестве альтернативного топлива // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №4(46). Т.1. С. 111-116.
4. Кича Г. П., Надежкин А. В., Семенюк Л. А. Новые стохастические модели очистки топлив и масел судовыми центробежными аппаратами со сложной гидродинамической обстановкой // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4(42). Т.5. С. 77-89.
5. Воробьев Б. Н., Надежкин А. В., Кича Г. П. Стохастическое моделирование разделения сложных гетерогенных систем судовых устройств на основе представлений и аппарата случайных марковских процессов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37). Т.2. С. 112-120.
6. Надежкин А. В., Кича Г. П., Семенюк Л. А. Оптимизация режимов комбинированной очистки моторного масла в судовых дизелях методом вариационного исчисления // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37). Т.2. С. 93-100.
7. Надежкин А. В., Безвербный А. В., Кича Г. П. Имитационная модель трибодиагностики двигателей внутреннего сгорания // Трение и смазка в машинах и механизмах. – М. : Машиностроение, 2009. №3. С. 6-14.

#### References

1. Gorelik G. B. Protsessy toplivopodachi v dizelyakh pri rabote na dolevykh i perekhodnykh rezhimakh. [Fuel supply processes in diesel engines when operating in partial and transient modes]. Khabarovsk, PNU Publ., 2003, 247 s.
2. Gorelik G. B. «Peretekanie» elektricheskoy moshchnosti pri paralel'noy rabote dizel'-generatorov i obespechenie kachestva rezhimov malyykh nagruzok, [Electric power flow between working in parallel diesel generators and quality assurance of small loads]. Khabarovsk, PNU Publ., 2016, 250 s.
3. Chistyakov A. Yu., Gorelik G. B., Mozolev O. N. Osobennosti protsessov toplivopodachi v dizelyakh pri ispol'zovanii vodotoplivnoy emul'sii v kachestve al'ternativnogo topliva [Features of fuel supply processes in diesels hen using water-fuel emulsion as an alternative fuel]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2019, T.1, 4(46), S. 111-116.
4. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Semenyuk L. A. Novye stokhasticheskie modeli ochistki topliv i masel sudovymi tsentrobezhnyimi apparatami so slozhnoy gidrodinamicheskoy obstanovkoy [New stochastic models for cleaning fuels and oils by marine centrifugal apparatus with a complex hydrodynamic situation]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2018, 4(42), T.5, S. 77-89.
5. Vorob'ev B. N., Nadezhkin A. V., Kicha G. P. Stokhasticheskoe modelirovanie razdeleniya slozhnykh geterogennykh sistem sudovykh ustroystv na osnove predstavleniy i apparata sluchaynykh markovskikh protsessov [Stochastic separation modeling of complex heterogeneous systems of ship devices on the basis of the concepts and apparatus of random markov processes]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2017, 3(37), T.2. S. 112-120.
6. Nadezhkin A. V., Kicha G. P., Semenyuk L. A. Optimizatsiya rezhimov kombinirovannoy ochistki motornogo masla v sudovykh dizelyakh metodom variatsionnogo ischisleniya [The approaches of the variation solution of comined cleaning modes of motor oil in marine diesel engines]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2017, №3(37), T.2, S. 93-100.
7. Nadezhkin A. V., Bezverbnyy A. V., Kicha G. P. Imitatsionnaya model' tribodiagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya [Simulation model of internal combustion engines tribodiagnosics]. Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax. M., izd. «Mashinostroenie», 2009, №3, S. 6-14.

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

**Геннадий Бенцианович Горелик**, доктор технических наук, профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания, Тихоокеанский государственный университет, 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, e-mail: ggorelik@mail.ru

**Gennadiy B. Gorelik**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Internal combustion engines, Pacific National University, Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680035, Russian Federation, e-mail: ggorelik@mail.ru

**Виталий Николаевич Даничкин**, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: danichkin@msun.ru

**Vitaliy N. Danichkin**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Marine Internal Combustion Engines, Maritime university named after admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovaya, 50a, Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: danichkin@msun.ru

**Олег Николаевич Мозолев**, старший преподаватель кафедры двигателей внутреннего сгорания, Тихоокеанский государственный университет, 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, e-mail: oleg19793@yandex.ru

**Oleg N. Mozolev**, Senior Lecturer of the Department of Internal combustion engines, Pacific National University, Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680035, Russian Federation, e-mail: oleg19793@yandex.ru

**Александр Юрьевич Чистяков**, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых энергетических установок, систем и оборудования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: glucker2000@mail.ru

**Alexandr Yu. Chistyakov**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Ship Power Plants, Systems and Equipment, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: glucker2000@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.11.2021; одобрена после рецензирования 11.01.2022, принята к публикации 24.02.2022.

The article was submitted 02.11.2021; approved after reviewing 11.01.2022; accepted for publication 24.02.2022.

Научная статья

УДК 629.127 (621.165)

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.013>

## Определение газодинамических характеристик сопловых аппаратов со сверхзвуковыми прямоугольными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин

Р.Р. Симашов<sup>1</sup> [forsimashov@yandex.ru](mailto:forsimashov@yandex.ru), С.В. Чехранов<sup>1</sup> [turboroom@yandex.ru](mailto:turboroom@yandex.ru)

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

**Аннотация.** Проектирование новой многорежимной малорасходной турбины предполагает постановку и решение задачи многорежимной оптимизации. Степень достоверности решения в большой степени определяется совпадением истинных и принятых в расчете потерь кинетической энергии в элементах проточной части турбины. На основе экспериментальных данных различных авторов установлена четкая граница по числу Маха на выходе из сопел, позволяющая выделить область, где эффективность сверхзвуковых МРТ с прямоугольными соплами выше, чем с осесимметричными. В работе приводятся обобщающие зависимости коэффициентов потерь кинетической энергии сопловых аппаратов со сверхзвуковыми прямоугольными соплами в широком диапазоне изменения определяющих геометрических и режимных параметров. Получены эмпирические формулы, учитывающие влияние геометрического угла выхода потока из сопел, геометрической степени расширения сопла, относительной высоты, относительной толщины выходных кромок сопел и числа Маха на коэффициент потерь кинетической энергии соплового аппарата. Переменные режимы работы сопла учитываются двухпараметрической зависимостью относительного коэффициента профильных потерь в функции от числа Маха и геометрической степени расширения сопла и зависимостью поправочного коэффициента концевых потерь в функции от числа Маха. Полученные в работе эмпирические зависимости позволяют использовать их при моделировании переменных режимов и многорежимной оптимизации малорасходных турбин.

**Ключевые слова:** малорасходные турбины, переменные режимы, коэффициенты потерь кинетической энергии, сопловые аппараты, сверхзвуковые прямоугольные сопла.

**Для цитирования:** Симашов Р.Р., Чехранов С.В. Определение газодинамических характеристик сопловых аппаратов со сверхзвуковыми прямоугольными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин. Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 107—111

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.013>

## Determination of gas-dynamic characteristics of nozzle diaphragms with supersonic rectangular nozzles in the modeling of variable duties of low-consumption turbines

Rafail R. Simashov<sup>1</sup> [forsimashov@yandex.ru](mailto:forsimashov@yandex.ru), Sergei V. Chekhranov<sup>1</sup> [turboroom@yandex.ru](mailto:turboroom@yandex.ru)

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

**Abstract.** The design of a new multi-mode low-consumption turbine involves the formulation and solution of the multi-mode optimization problem. The degree of reliability of the solution is largely determined by the coincidence of the true and calculated losses of motional energy in the elements of the flow path of the turbine. Based on the experimental data of various authors, a clear boundary has been established in terms of the Mach number at the nozzle outlet, which makes it possible to single out the region where the efficiency of supersonic low-consumption turbines with rectangular nozzles is higher than with axisymmetric ones. The paper presents generalizing dependences of the motional energy loss ratios of nozzle diaphragms with rectangular supersonic nozzles in a wide range of variation of the governing geometrical and operating parameters. Empirical formulas are obtained that take into account the influence of the geometric angle of the flow from the nozzles, the geometric degree of expansion of the nozzle, the relative height, the relative thickness of the outlet edges of the nozzles and the Mach number on the motional energy loss ratio of the nozzle diaphragm. Variable duties of the nozzle operation are taken into account by the two-parameter dependence of the relative coefficient of profile losses as a function of the Mach number and the geometric degree of expansion of the nozzle and the dependence of the correction coefficient of end losses as a function of the Mach number. The empirical dependencies obtained in this work make it possible to use them in modeling variable duties and multi-mode optimization of low-consumption turbines.

**Key words:** low-consumption turbines, variable duties, motional energy loss ratio, nozzle diaphragm, supersonic rectangular nozzles.

**For citation:** Rafail R. Simashov, Sergei V. Chekhranov Determination of gas-dynamic characteristics of nozzle diaphragms with supersonic rectangular nozzles in the modeling of variable duties of low-consumption turbines. Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 107—111

## Введение

Проектирование новой многорежимной малорасходной турбины (МРТ) предполагает постановку и решение задачи многорежимной оптимизации (МО). Степень достоверности решения в большой степени определяется совпадением истинных и принятых в расчете потерь кинетической энергии в элементах проточной части МРТ.

В настоящее время в сверхзвуковых МРТ применяются сопловые аппараты (СА) двух типов: СА, составленные из осесимметричных круглых (ОС) и прямоугольных сопел. Обнаруживается довольно четкая граница по числу Маха на выходе из сопел ( $M_{1f} \approx 1.5$ ), позволяющая выделить области, где эффективность сверхзвуковых МРТ с прямоугольными соплами выше, чем с ОС, и наоборот. По экспериментальным данным работ [1, 2], полученным при исследовании двухвенечных ступеней скорости, турбины, имеющие СА с ОС, дают повышение КПД при  $M_{1f} > 1.5$ . При этом существенный выигрыш в экономичности наблюдается на переменных режимах. Этот факт был подтвержден исследованиями, проведенными в [3] на одновенечной ступени, и позднее опытами, представленными в работе [4].

Поэтому возникает задача определения наиболее рациональной конструкции проточной части МРТ в заданном диапазоне режимов, которая может быть решена путем сравнения результатов решения задач многорежимной оптимизации МРТ с различными типами СА.

Эмпирические зависимости для определения потерь кинетической энергии в СА с ОС, которые могут быть использованы при моделировании переменных режимов МРТ на этапе многорежимной оптимизации представлены в работе [5]. Ниже приводятся обобщения опытных данных и эмпирические зависимости коэффициентов потерь кинетической энергии в СА с прямоугольными соплами позволяющие использовать их в задачах многорежимной оптимизации МРТ.

### 1. Обобщения опытных данных по коэффициентам потерь кинетической энергии прямоугольных сопел

Большое количество работ, в которых приводятся простые эмпирические зависимости, для определения потерь кинетической энергии, и которые могут быть использованы в задачах оптимизации МРТ [6, 7 и др.], посвящено либо дозвуковым, либо трансзвуковым решеткам профилей. Обобщения экспериментальных данных по сверхзвуковым СА с прямоугольными соплами позволяющие использовать их при решении задачи многорежимной оптимизации авторам не известны. В работах [8, 9] приводятся графические зависимости коэффициентов профильных потерь энергии в прямоугольных соплах от числа  $M_{1f}$  (либо от  $M_{1f}$  и одного какого-либо геометрического параметра), которые рекомендуются для расчетов переменных режимов. Представленные в работах [10] и [11, 12] графические зависимости относятся к конкретным решеткам и сопловым аппаратам различных типов и могут быть использованы для расчетов переменных

режимов, однако применение их в задачах многорежимной оптимизации проблематично, ввиду конкретности данных зависимостей и не возможности удовлетворить требованию однотипности (в основу решеток типа И и Р [10] положены различные законы профилирования, а СА из работ [11, 12] не удовлетворяют требованию геометрического подобия). Конкретный характер носит и методика, представленная в работе [13], в которой для совпадения результатов расчетов с экспериментальными данными вводится серия коэффициентов, которые для каждой конкретной турбины находятся подбором и справедливы для конкретной МРТ и в рамках данной модели сверхзвуковой МРТ.

В связи с изложенным возникает задача построения эмпирических зависимостей для определения коэффициентов потерь кинетической энергии в СА с прямоугольными соплами путем синтеза уже имеющихся с вновь полученными зависимостями для отдельных составляющих потерь, которые бы могли быть использованы при моделировании переменных режимов МРТ на этапе многорежимной оптимизации.

В основу модели положим обширный экспериментальный материал, полученный при исследовании прямоугольных сопел МЭИ содержащийся в работе [14]. Как было показано в работе [15] профили, разработанные в МЭИ, более эффективны на переменных режимах и не уступают в экономичности на расчетном режиме. Приведенная в работе [14] полуэмпирическая методика построения таких профилей содержит четкие рекомендации и позволяет использовать ее при проектировании СА малорасходных турбин с прямоугольными соплами.

### 2. Эмпирические зависимости коэффициентов потерь кинетической энергии прямоугольных сверхзвуковых сопел

Коэффициент потерь кинетической энергии в прямоугольных соплах будем представлять, в виде суммы отдельных составляющих потерь, где влияние отдельных определяющих факторов учитывается путем введения соответствующих поправочных коэффициентов [3, 10, 16].

В результате анализа экспериментальных исследований [3, 14] на плоских сверхзвуковых сопловых решетках установлена зависимость коэффициента потерь кинетической энергии  $\xi_c$  от геометрического угла выхода потока из сопел  $\alpha_{1k}$  (угол входа  $\alpha_0$  предполагается равным  $90^\circ$ ), геометрической степени расширения канала  $f_c$ , относительной высоты  $l_c/b_c$  ( $l_c$  - высота лопатки;  $b_c$  - хорда профиля) и числа  $M_{1f}$ . Среди множества параметров влияющих на  $\xi_c$ , эти являются определяющими. В прямоугольных соплах сверхзвуковых МРТ к перечисленным выше определяющим параметрам, добавляется еще один параметр: относительная толщина выходных кромок сопел  $\bar{\Delta}_{kp} = \Delta_{kp}/a_1$  ( $a_1$  - размер горла выходного сечения сопла) ввиду повышенных значений данного параметра, что вызвано малоразмерностью МРТ.

На рис. 1 показано изменение минимальных профильных потерь в решетках при расчетном значении  $M_{1t}^p$  в зависимости от угла  $\alpha_{1k}$ .

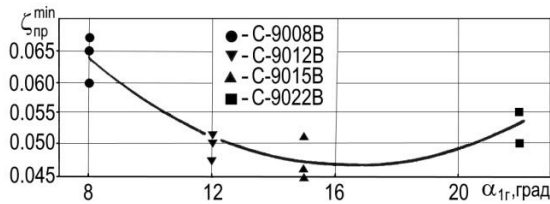


Рис. 1. Зависимость минимальных профильных потерь  $\zeta_{пр}^{min}$  в сверхзвуковых сопловых решетках от геометрического угла косога среза  $\alpha_{1k}$

Все экспериментальные точки, с различными значениями параметра  $f_c$ , достаточно хорошо группируются на одной кривой. Разброс экспериментальных точек относительно обобщающей кривой не превышает 0,003 абсолютных (6 % относительных). Указанная зависимость хорошо аппроксимируется полиномом второй степени:

$$\zeta_{пр}^{min} = 0.1093 - 0.0076 \alpha_{1k} + 0.00023 \alpha_{1k}^2, \quad (1)$$

где  $\alpha_{1k}$  - в градусах.

Влияние на коэффициент профильных потерь относительной толщины кромки  $\bar{\Delta}_{кр}$ , геометрической степени расширения  $f_c$  и числа  $M_{1t}$  учтем в виде поправочных коэффициентов,  $K_{кр}(\bar{\Delta}_{кр})$  и  $K_m^{пр}(f_c, M_{1t})$ .

Коэффициент  $K_{кр}(\bar{\Delta}_{кр})$  рассчитывается по приведенной в [10] формуле

$$K_{кр} = 0.7 + 3.5 \bar{\Delta}_{кр} + 6.7 \bar{\Delta}_{кр}^{-2}. \quad (2)$$

Представленная на рис. 2 зависимость  $K_m^{пр}(f_c, M_{1t})$  получена в результате обобщения атласных данных [14] для сверхзвуковых решеток профилей с различными  $\alpha_{1k}$ . Для определения

$K_m^{пр}(f_c, M_{1t})$  используется процедура интерполяции функции двух переменных полиномами Лагранжа второй степени.

Влияние относительной высоты прямоугольных сопел будем учитывать коэффициентом конечных потерь. Имеющиеся опытные данные показывают, что с увеличением числа  $M_{1t} \leq 1,2 \dots 1,3$  конечные потери уменьшаются, а затем при  $M_{1t} > 1,3$  наблюдается их интенсивный рост. Это свидетельствует о довольно сильной зависимости конечных потерь от числа  $M_{1t}$  (рис. 3).

Опытные данные, представленные на рис. 3, удовлетворительно группируются на одной кривой, описываемой полиномом четвертой степени:

$$\zeta'_{конц} = -0.5233 + 1.864 M_{1t} - 2.3352 M_{1t}^2 +$$

$$+ 1.2495 M_{1t}^3 - 0.2402 M_{1t}^4, \quad (3)$$

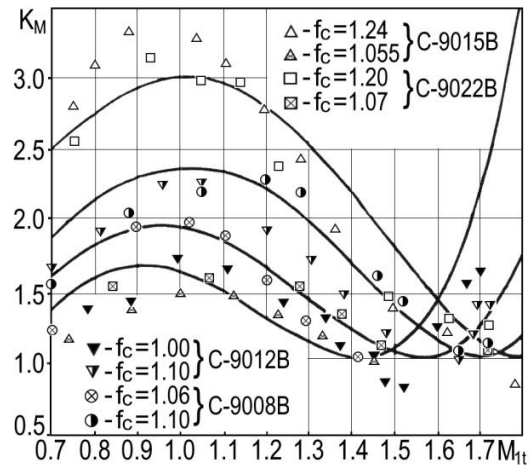


Рис. 2. Влияние числа  $M_{1t}$  и геометрической степени расширения  $f_c$  на коэффициент профильных потерь в сверхзвуковых сопловых решетках

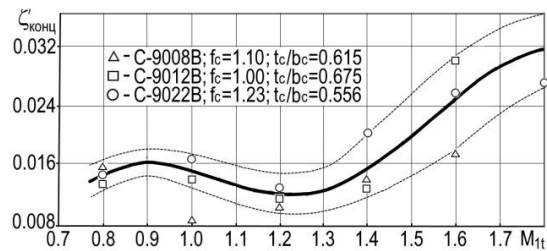


Рис. 3. Влияние числа  $M_{1t}$  на коэффициент конечных потерь в сверхзвуковых сопловых решетках

Таким образом, коэффициент потерь кинетической энергии в СА с прямоугольными соплами, с учетом прямой пропорциональности конечных потерь от параметра  $b/l$  может быть вычислен по следующей функциональной зависимости:

$$\zeta_c = \zeta_{пр} + \zeta_{конц} = \zeta_{пр}^{min}(\alpha_{1k}) K_{кр}(\bar{\Delta}_{кр}) K_m^{пр}(f_c, M_{1t}) + \zeta'_{конц}(M_{1t}) \frac{b_c}{l_c}. \quad (4)$$

### Заключение

Приведенные зависимости (1) ... (4) совместно с процедурой квадратичной интерполяции составляют математическую модель определения коэффициента потерь кинетической энергии в СА с прямоугольными соплами и отражают влияние на потери кинетической энергии определяющих параметров  $\alpha_{1k}$ ,  $f_c$ ,  $b_c/l_c$ ,  $\bar{\Delta}_{кр}$ ,  $M_{1t}$ . Данная модель может быть использована при моделировании переменных режимов и решении задач многорежимной оптимизации МРТ в области определения независимых параметров  $\Omega_{опред} = \{8 \leq \alpha_{1k}, \text{град} \leq 22, 1.0 \leq f_c \leq 1.2, b_c/l_c \leq 3.0, 0.7 \leq M_{1t} \leq 1.8\}$  с близкими к

оптимальным относительными шагами  $(t/b)_c = 0.6$

... 0.9 и в автомодельной по числу

$Re_{1t} = c_{1t} b_c / v_{1t} \geq 5 \cdot 10^5$  области.

#### Литература

1. Поликовский М.В., Щеколдин А.В. О выборе конструкции соплового аппарата для сверхзвуковой регулирующей ступени. Теплоэнергетика. 1958. №11. С.56-60.
2. Щеколдин А.В., Кирюхин В.И. Регулирующие ступени скорости малой и средней мощности. Теплоэнергетика. 1961. №9. С.36-40.
3. Дейч М.Е., Трояновский Б.М. Исследование и расчеты ступеней осевых турбин. М.: Машиностроение, 1964. 628 с.
4. Курзон А.В., Власов Е.Н. Влияние конструкции сопел на экономичность сверхзвуковой двухвенечной турбинной ступени при малых степенях впуска. Судостроение. 1965. №6. С. 28-31.
5. Симашов Р.Р., Чехранов С.В. Определение газодинамических характеристик сопловых аппаратов с сверхзвуковыми осесимметричными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин. Морские интеллектуальные технологии. 2016. № 3(33) Т.1. С. 173-180.
6. Бойко А.В., Говорущенко Ю.И., Усатый А.П. Создание эмпирической методики определения коэффициентов потери энергии в турбинных решетках с помощью теории планирования экспериментов. Энергетическое машиностроение. 1986. Вып.42. С.9-14.
7. Лапшин К.Л. К оценке профильных потерь при проектировании осевых тепловых турбин. Изв. вуз. Энергетика. 1983. №9. С.73-78.
8. Степанов Г.Ю., Эпштейн В.А., Гольцев В.В. и др. Атлас экспериментальных характеристик плоских турбинных решеток. М.: ЦИАМ, 1964. 136 с.
9. Разработка и исследование унифицированной проточной части повышенной экономичности для турбоприводов вспомогательных механизмов: Отчет. Ленингр. корабл. ин-т; Рук. темы А.М. Топунов - № НГ 7-404-81; инв. №0182.1025710. Л., 1981. 214с.
10. Самойлович Г.С., Трояновский Б.М. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. М.: Энергоиздат, 1982. 496 с.
11. Фершалов Ю.Я., Чехранов С.В. Статические испытания сопловых аппаратов с малыми углами выхода потока. Судостроение. 2005. №5. С. 54-56.
12. Фершалов Ю.Я., Фершалов А.Ю., Симашов Р.Р. Газодинамические характеристики сопловых аппаратов с малыми углами выхода потока в составе осевой малорасходной турбины. Судостроение. 2009. №6. С. 56-58.
13. Овсянников Б.В., Уваров С.Е., Худенко Б.Г. Особенности расчета кпд активной парциальной газовой турбины при изменении противодавлений в широком диапазоне. Изв. вуз. Авиационная техника. 1990. №1. С.66-70.
14. Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я. Атлас профилей решеток осевых турбин. М.: Машгиз, 1965. 96 с.
15. Симашов Р.Р., Чехранов С.В., Ханькович И.Н. Определение расходных характеристик сопловых аппаратов с сверхзвуковыми прямоугольными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1(47) Т.2. С. 100-104.
16. Щегляев А.В., Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Расчет ступеней паровых турбин по результатам статических продувок решеток. Теплоэнергетика. 1962. №3. с.14-18.

#### References

1. Polikovskiy M.V., Shchekoldin A.V. O vybere konstruktсии soplovogo apparata dlya sverkhzvukovoy reguliruyushchey stupeni [On the choice of the design of the nozzle apparatus for the supersonic control stage]. Teploenergetika. 1958. №11. S.56-60.
2. Shchekoldin A.V., Kiryukhin V.I. Reguliruyushchie stupeni skorosti maloy i sredney moshchnosti [Low-and medium-power speed control stages]. Teploenergetika. 1961. №9. S.36-40.
3. Deych M.E., Troyanovskiy B.M. Issledovanie i raschety stupeney osevykh turbin [Research and calculations of axial turbine stages]. M.: Mashinostroenie, 1964. 628 s.
4. Kurzon A.V., Vlasov E.N. Vliyanie konstruktсии sopel na ekonomichnost' sverkhzvukovoy dvukhvenechnoy turbinnoy stupeni pri malykh stepenyakh vpuska [The influence of the nozzle design on the efficiency of a supersonic two-stage turbine stage at low intake degrees]. Sudostroenie. 1965. №6. S. 28-31.
5. Simashov R.R., Chekhranov S.V. Opredelenie gazodinamicheskikh kharakteristik soplovykh apparatov s sverkhzvukovymi osesimmetrichnymi soplami pri modelirovanii peremennykh rezhimov maloraskhodnykh turbin [Determination of gas-dynamic behaviour of supersonic axisymmetric nozzle diaphragm in designing of varying duty of low-consumption turbines]. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2016. № 3(33) T.1. S. 173-180.
6. Boyko A.V., Govorushchenko Yu.I., Usatyy A.P. Sozdanie empiricheskoy metodiki opredeleniya koeffitsientov poteri energii v turbinnykh reshetkakh s pomoshch'yu teorii planirovaniya eksperimentov [Creation of an empirical method for determining the energy loss coefficients in turbine arrays using the theory of experimental planning]. Energeticheskoe mashinostroenie. 1986. Vyp.42. S.9-14.
7. Lapshin K.L. K otsenke profil'nykh poter' pri proektirovanii osevykh teplovykh turbin [On the assessment of profile losses in the design of axial heat turbines]. Izv. vuz. Energetika. 1983. №9. S.73-78.
8. Stepanov G.Yu., Epshteyn V.A., Gol'tsev V.V. i dr. Atlas eksperimental'nykh kharakteristik ploskikh turbinnykh reshetok [Atlas of experimental characteristics of flat turbine gratings]. M.: TsIAM, 1964. 136 s.

9. Razrabotka i issledovanie unifitsirovannoy protochnoy chasti povyshennoy ekonomichnosti dlya turboprivodov vspomogatel'nykh mekhanizmov [Development and research of a unified flow part of increased efficiency for turbo drives of auxiliary mechanisms]: Otchet. Leningr. korabl. in-t; Ruk. temy A.M. Topunov - № NG 7-404-81; inv. №0182.1025710. L., 1981. 214s.
10. Samoylovich G.S., Troyanovskiy B.M. Peremennye i perekhodnye rezhimy v parovykh turbinakh [Variable and transient modes in steam turbines]. M.: Energoizdat, 1982. 496 s.
11. Fershalov Yu.Ya., Chekhranov S.V. Sticheskie ispytaniya soplovykh apparatov s malymi uglami vykhoda potoka [Static tests of nozzle devices with small flow exit angles]. Sudostroenie. 2005. №5. S. 54-56.
12. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A.Yu., Simashov R.R. Gazodinamicheskie kharakteristiki soplovykh apparatov s malymi uglami vykhoda potoka v sostave osevoy maloraskhodnoy turbiny [Gas-dynamic characteristics of nozzle devices with small flow exit angles as part of an axial low-flow turbine]. Sudostroenie. 2009. №6. S. 56-58.
13. Ovsyannikov B.V., Uvarov S.E., Khudenko B.G. Osobennosti rascheta kpd aktivnoy partsial'noy gazovoy turbiny pri izmenenii protivodavleniy v shirokom diapazone [Features of calculating the efficiency of an active partial gas turbine when the back pressure changes in a wide range]. Izv. vuz. Aviatsionnaya tekhnika. 1990. №1. S.66-70.
14. Deych M.E., Filippov G.A., Lazarev L.Ya. Atlas profiley reshetok osevykh turbin [Atlas of axial turbine grid profiles]. M.: Mashgiz, 1965. 96 s.
15. Simashov R.R., Chekhranov S.V., Khan'kovich I.N. Opredelenie raskhodnykh kharakteristik soplovykh apparatov s sverzvukovymi pryamougol'nymi soplami pri modelirovanii peremennykh rezhimov maloraskhodnykh turbin [Determination of mass flow characteristics of supersonic rectangular nozzle diaphragms in modeling variable duties of low-consumption turbines]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 1(47) T.2. S. 100-104.
16. Shcheglyayev A.V., Deych M.E., Filippov G.A. Raschet stupeney parovykh turbin po rezul'tatam sticheskiykh produvkov reshetok [Calculation of steam turbine stages based on the results of static grid purges]. Teploenergetika. 1962. №3. s.14-18.

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

**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

**Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б, e-mail: turboroom@yandex.ru

**Sergei V. Chekhranov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: turboroom@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 04.09.2021; одобрена после рецензирования 20.12.2021, принята к публикации 02.02.2022.

The article was submitted 04.09.2021; approved after reviewing 20.12.2021; accepted for publication 02.02.2022.



## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ SYSTEM ANALYSIS, FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE

Научная статья

УДК 004.89: 656.078

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.014>

### Методы выявления знаний и их применение для создания интеллектуальных систем

Ю.М. Искандеров<sup>1</sup> iskanderov\_y\_m@mail.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр РАН

**Аннотация.** Выявление знаний является одним из ключевых этапов создания интеллектуальных систем. Показано, что процедура выявления знаний заключается в определении и выборе соответствующих источников знаний, релевантных предметной области построения интеллектуальных систем. Выбираемые источники знаний должны удовлетворять требованиям определенных условий. В статье рассмотрены следующие методы выявления знаний: метод составления списка источников знаний; метод тестирования экспертов; метод ключевых слов и образов; квалиметрический метод определения источников знаний. Отмечены особенности реализации каждого метода. Использование изложенных методов выявления знаний, как в отдельности, так и в определенной комбинации, в итоге обеспечивает получение множества источников знаний, которые содержат релевантную информацию, необходимую для успешного решения задач. Показано, что методы выявления знаний различаются между собой по точности, достоверности, глубине проработки. Выбор и применение того или иного метода зависит от конкретной решаемой задачи и наличия соответствующих ресурсов организационно-технологического исполнения.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система, выявление знаний, источник знаний, предметная область, эксперт, степень релевантности, качество, метод.

**Для цитирования:** Искандеров Ю.М. Методы выявления знаний и их применение для создания интеллектуальных систем, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 112—120

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.014>

### Knowledge Identifying Methods and Their Application to Create Intelligent Systems

Yury M. Iskanderov<sup>1</sup> iskanderov\_y\_m@mail.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Knowledge identification is one of the key stages in the creation of intelligent systems. It is shown that the procedure for identifying knowledge consists in identifying and choosing the appropriate sources of knowledge that are relevant to the subject area of building intelligent systems. The selected sources of knowledge must satisfy the requirements of certain conditions. The article discusses the following methods of identifying knowledge: the method of compiling a list of sources of knowledge; method of testing experts; method of keywords and key images; qualimetric method for determining the sources of knowledge. The features of the implementation of each method are noted. The use of the outlined methods for identifying knowledge, both individually and in a certain combination, ultimately provides a set of knowledge sources that contain relevant information necessary for the successful solution of problems. It is shown that the methods for revealing knowledge differ among themselves in accuracy, reliability, depth of elaboration. The choice and application of one method or another depends on the specific problem being solved and the availability of appropriate resources for organizational and technological performance.

**Keywords:** intelligent system, knowledge identification, source of knowledge, subject area, expert, degree of relevance, quality, method.

**For citation:** Yury M. Iskanderov Knowledge Identifying Methods and Their Application to Create Intelligent Systems, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 112—120

#### Введение

В теории систем [1-4] существует класс больших сложных динамических систем, для которых характерны большое количество разнородных элементов, значительная сложность функциональных связей между ними, высокий динамизм протекающих процессов. Реальными примерами таких систем являются городское хозяйство, банковская сфера, транспорт,

строительство, телекоммуникационные сети и др. Эффективное функционирование указанных систем немислимо без применения всей мощи новых средств автоматизации управления ими. В современных условиях, используя достижения в области искусственного интеллекта, существует реальная возможность реализации общения специалиста с компьютером на привычном профессиональном языке; распознавания и осуществления классификации ситуаций;

нахождения вариантов решений в соответствии с поставленными целями; выдачи рекомендаций с их обоснованием и т.д. Реализация этих функций осуществляется в рамках создания интеллектуальных систем (ИС). За последние годы создано значительное количество инструментальных средств, поддерживающих разработку ИС в различных предметных областях. [5-14]. Однако, один из ключевых этапов создания ИС такой как *выявление знаний*, по-прежнему, при реализации вызывает существенные трудности, которые связаны с неформальным содержанием этого этапа. Процедура выявления знаний заключается в определении и выборе соответствующих источников знаний, релевантных предметной области построения ИС. Этот выбор имеет нетривиальный характер и играет очень важную роль, поскольку заказчику требуется чтобы в ИС присутствовала адекватная достоверная информация для решения задач, а разработчику необходимо это требование обеспечить, т.к. он несет ответственность за качество создаваемой ИС. Целью этой процедуры является формирование такого множества *источников знаний*, которые *возможно и необходимо* привлечь для построения соответствующей ИС.

### 1. Источники знаний и их особенности

В настоящее время не существует строгого определения понятия «источник знаний», и, следовательно, отсутствует строгая классификация самих источников. Это безусловно связано с трудностями развития инженерии знаний. Тем не менее, известно [5-7], что все источники знаний можно разделить на 2 основных типа:

- люди – эксперты, т.е. *одушевленные источники знаний*;
- различного рода носители информации (рукописи, книги, печатные документы, аудио- и видеодиски, магнитные диски и т.д.), т.е. *неодушевленные источники знаний*.

В зависимости от целей и задач разработки ИС организацию выбора источников знаний, как одушевленных, так и неодушевленных, определения их состава и количества, осуществляет определенным образом, сформированная группа специалистов, состоящая из системных аналитиков и инженеров по знаниям. Как правило, эта группа формируются директивно и осуществляет выполнение процедуры выявления знаний на основе заранее утвержденного документа, в котором сформулирована решаемая проблема и в качестве которого, обычно, используется техническое задание на создание ИС.

Вопрос определения количества источников знаний для каждой задачи решается отдельно. Минимальное их число определяется возможностью покрыть все аспекты, подлежащие рассмотрению при создании ИС, т.е. источников знаний должно быть достаточно для того, чтобы в совокупности можно было бы учесть существенные свойства задач и получить соответствующие решения.

Дадим следующие определения.

*Источником знаний* называется одушевленный или неодушевленный носитель релевантной информации, обеспечивающей решение задач в конкретной предметной области.

*Потенциальным источником знаний* называется источник знаний, который может быть использован при построении ИС.

*Реальным (действительным) источником знаний* называется источник, знания которого использованы при построении ИС.

Следует отметить, что процедура выявления знаний играет важную роль, поскольку не каждый источник знаний может быть использован для построения ИС. Для того, чтобы источник знаний можно было включить в состав искомого множества, он должен удовлетворять следующим условиям:

- *источник знаний должен обладать релевантной информацией о предметной области ИС;*

- *источник знаний должен обладать, по возможности, максимумом степени доверия к себе;*

- *должна иметься возможность доступа к источнику знаний;*

- *должна существовать возможность извлечения знаний из источника знаний.*

Исходя из сказанного выше, процедура выявления знаний может быть представлена следующей совокупностью подпроцедур:

- формирование подмножества одушевленных источников знаний;

- проверка условий для подмножества одушевленных источников знаний;

- формирование подмножества неодушевленных источников знаний;

- проверка условий для подмножества неодушевленных источников знаний;

- формирование множества источников знаний.

Процедура выявления знаний реализуется с помощью соответствующих методов.

### 2. Применение метода составления списка источников знаний

Метод составления списка источников знаний является самым традиционным и постоянно используемым методом [15,16]. Он характерен своей естественностью реализации, поскольку содержание данного метода заключается в формировании списка источников знаний (одушевленных и неодушевленных отдельно) на основе определенной шкалы предпочтений, диктуемой решаемой задачей.

Из состава сформированной группы специалистов выделяется один (или больше), наиболее подготовленный и авторитетный в предметной области создания ИС. Этот специалист, опираясь на техническое задание, свои опыт и знания, формирует список источников и фиксирует его на бумажном или каком-либо другом носителе. Далее проводится обсуждение этого списка в группе разработчиков. Если в процессе обсуждения появились реальные дополнения к списку, то они включаются в его состав. Если дополнений не выявлено, то список считается сформированным и утвержденным.

В случае, когда список источников знаний формируется группой (более одного) специалистов, то в описанную выше последовательность действий, после составления индивидуальных списков, включается процедура формирования обобщенного списка. Если количество источников знаний не зафиксировано, то используется объединение индивидуальных списков и исключение из него

повторяющихся источников знаний. Если количество источников знаний зафиксировано, то используется процедура балльных оценок [2], когда в список включаются источники знаний, набравшие наибольшее количество баллов. В процессе формирования списка может быть выполнено несколько итераций. Указанный метод составления списка источников знаний используется как для одушевленных, так и неодушевленных источников и является наиболее простым и универсальным, с точки зрения организационно-технологического исполнения.

### 3. Применение метода тестирования экспертов

В ходе создания ИС, часто возникает ситуация недостатка соответствующих одушевленных источников знаний, тогда группе разработчиков требуется привлечение дополнительно специалистов, которые обладают необходимыми знаниями в предметной области решаемых задач. В этом случае используется метод тестирования экспертов. Его содержание состоит в следующем: потенциальному участнику - эксперту предлагается ответить устно или в письменной форме на ряд вопросов, с тем чтобы проверить его знания в предметной области ИС и выявить уровень его профессиональных и человеческих свойств.

Письменная часть тестирования наиболее часто осуществляется с помощью методов анкетирования [17-19]. В анкете содержатся вопросы, которые классифицируются по содержанию и по типу.

По *содержанию* вопросы делятся на три группы:

- объективные данные об эксперте (возраст, образование, должность, специальность, стаж работы и т.п.);
- основные вопросы по сути создания ИС;
- дополнительные вопросы, позволяющие выяснить источники информации, аргументацию ответов, самооценку компетентности эксперта и т.п.

По *типу* вопросы классифицируются на *открытые, закрытые и с перечнем ответов* [17-19]. Тот или иной класс вопросов, или их комбинация, применяется в зависимости от специфики предметной области разрабатываемой ИС.

Открытые вопросы предполагают ответы произвольной форме. Закрытые вопросы - это такие вопросы, на которые ответ дается в виде «да», «нет», «не знаю». Вопросы с перечнем ответов предполагают выбор экспертами какого-либо одного из совокупности предложенных ответов. Открытые вопросы целесообразно применять в случае большой неопределенности проблемы. Этот тип вопросов позволяет широко охватить рассматриваемую проблему, выявить спектр мнений экспертов. Недостатком открытых вопросов является возможное большое разнообразие и произвольная форма ответов, что существенно затрудняет обработку анкет.

Закрытые вопросы применяются в случае рассмотрения четко определенных двух альтернативных вариантов, когда требуется по существу определить степень большинства мнений по этим альтернативам. Обработка закрытых вопросов не вызывает каких-либо трудностей.

Вопросы с перечнем ответов целесообразно использовать при наличии нескольких достаточно четко определенных альтернативных вариантов. Эти

варианты формируются для ориентации экспертов по возможному кругу направлений в решении проблемы. Для получения более детальной информации по каждому вопросу предлагаются порядковая или балльная шкалы. Эксперт по каждому ответу выбирает значение порядковой и балльной оценок. Например, значениями шкалы могут быть традиционные оценки: «отлично» (5 баллов), «хорошо» (4 балла), «удовлетворительно» (3 балла), «неудовлетворительно» (2 балла) и т.п. Обработка анкет с вопросами этого типа по сложности занимает промежуточное положение между открытыми и закрытыми вопросами.

Устная часть тестирования осуществляется в виде беседы-интервью [17-19]. Достоинством такой формы является непрерывный живой контакт интервьюера с экспертом, что позволяет быстро получить необходимую информацию путем прямых и уточняющих вопросов в зависимости от ответов эксперта.

Для проведения процедуры тестирования экспертов руководитель разработки ИС задействует существующую рабочую группу системных аналитиков и инженеров по знаниям. На эту группу возлагаются следующие обязанности: разработать анкету, подготовить вопросы для интервью, провести тестирование, обработать результаты тестирования.

При разработке анкеты необходимо учитывать следующие особенности: во-первых, анкета должна быть составлена на корректном, ясном, понятном экспертам языке; во-вторых, анкета не должна быть монотонной и однообразной; в-третьих, последовательность вопросов в анкете должна быть строго продумана; в-четвертых, избыточность вопросов должна быть минимизирована.

Для беседы-интервью вопросы необходимо специально разрабатывать. Характерной особенностью этих вопросов является возможность быстрого ответа на них экспертов, поскольку он практически не имеет времени на его обдумывание. Тематика интервью сообщается эксперту заранее, но конкретные вопросы ставятся непосредственно в процессе беседы. Целесообразно, в связи с этим, готовить последовательность вопросов, начиная с простого и постепенно их углубляя и усложняя, но вместе с тем и конкретизируя.

Проведение тестирования и организацию обработки результатов можно организовать различными способами с применением разнообразных технических средств, в зависимости от конкретных условий и наличия необходимых ресурсов [17-19].

Тестирование осуществляется в очной или очно-заочной форме, в различных комбинациях письменного и устного опросов. Процесс тестирования и полученные результаты в обязательном порядке документируются.

Обработка результатов тестирования осуществляется с целью получения оценки, характеризующей эксперта, в качестве которой, как правило, выступает его ранг или вес [2]. Очевидно, что чем выше ранг или больше вес эксперта, тем целесообразнее его привлечение к разработке ИС.

### 4. Применение метода ключевых слов и образов

Известным методом инженерии знаний является метод ключевых слов и образов [20-25]. Этот метод

используется для выявления неодоушевленных источников знаний - книг (учебников, справочников и т.п.), отчетов, руководящих документов, инструкций, планов, карт, а также различных магнитных носителей информации (видео- и аудиокассет, дискет, компакт-дисков и т.п.), имеющих отношение к исследуемому фрагменту предметной области.

Существуют различные подходы к определению понятия «ключевое слово». В общенаучном понимании ключевые слова – слова, определяющие содержание текста и передающие его основной смысл. Анализ доступных публикаций показывает, что приводимые различными авторами с позиций разнообразных подходов определения ключевых слов зачастую однотипны, но при этом недостаточно формализованы [20-22,25]. Обобщая многочисленные взгляды можно заключить, что под ключевыми словами следует понимать наиболее важные, общепонятные, ёмкие и показательные для определенной предметной области слова в тексте, совокупность которых может дать высокоуровневое описание его содержания для читателя, обеспечив компактное представление и хранение его смысла в памяти. Аналогично можно охарактеризовать понятие «ключевой образ» применительно к графической информации, т.е. рисункам, схемам, диаграммам и т.д.

Следует отметить, что основным содержанием рассматриваемого метода является получение оценки релевантности неодоушевленного источника знаний для создания ИС. С этой целью метод ключевых слов и образов реализуется рабочей группой, состоящей из системных аналитиков и инженеров по знаниям. Рассмотрим предлагаемый алгоритм, позволяющий ввести определенную формализацию при использовании данного метода (рис.1).



Рис. 1. Алгоритм метода ключевых слов и образов

1. Осуществляется семиотический анализ утвержденного исходного описания проблемы создания ИС (технического задания) с целью получения совокупности слов и образов, отражающих наиболее существенные и устойчивые понятия, отношения и свойства, характерные для исследуемого фрагмента предметной области.

Такие слова и образы будут являться *ключевыми*, а полученная совокупность будет называться *эталонной*. Количество элементов эталонной совокупности не должно быть слишком большим, чтобы не затруднять оценку релевантности. Поэтому целесообразно, чтобы эта совокупность содержала порядка 20 - 30 элементов. Однако, возможны и отклонения, как в большую, так и в меньшую сторону. Для удобства использования элементы эталонной совокупности целесообразно перенумеровать. Фактически, эталонная совокупность будет служить вполне определенным образцом для оценки степени релевантности источника знаний.

2. Определяется наличие элементов эталонной совокупности, т.е. ключевых слов и образов, в содержании неодоушевленного источника знаний с использованием метода поиска по образцу.

В зависимости от наличия ресурсов процедура поиска элементов по образцу организуется следующими способами: последовательным, параллельным или комбинированным.

При нахождении соответствующего элемента делается пометка. В качестве пометки используется символ заранее определенного вида, например «\*». Поскольку элемент эталонной совокупности в процессе поиска может встретиться неоднократно, то пометка делается один раз при первой встрече, а затем их количество суммируется в соответствии с количеством встреч. Процедура поиска осуществляется до тех пор, пока все возможные источники знаний не будут рассмотрены на предмет наличия всех элементов эталонной совокупности. В результате для каждого неодоушевленного источника знаний накапливается свое число пометок, характеризующее количество найденных по образцу ключевых слов и образов.

3. Осуществляется непосредственная оценка релевантности неодоушевленного источника знаний для создания ИС.

Как было отмечено выше, показателем оценки является степень релевантности источника знаний. Определим ее.

Пусть  $N$  - количество элементов эталонной совокупности;  $M$  - количество источников знаний;  $n_i$  - число пометок для  $i$ -го источника знаний, где  $i=1, M$ . Тогда степень релевантности  $a_i$   $i$ -го источника знаний может быть получена:

$$a_i = n_i / N, i=1, \dots, M.$$

Очевидно, что значения  $a_i$  попадают в интервал  $[0,1]$ . Введем и установим следующую градацию степени релевантности  $a_i$ :

- «полная», если  $a_i = 1$ ;
- «высокая», если  $0.7 \leq a_i < 1$ ;
- «значительная», если  $0.5 \leq a_i < 0.7$ ;
- «достаточная», если  $0.3 \leq a_i < 0.5$ ;
- «незначительная», если  $0.15 \leq a_i < 0.3$ ;
- «несущественная», если  $0 < a_i < 0.15$ ;
- «нулевая», если  $a_i = 0$ .

Введенная градация характеризует источник знаний качественно на основе количественной

оценки степени его релевантности. Иначе говоря, чем больше значение  $a_i$ , тем целесообразнее использование  $i$ -го источника для создания ИС.

Значение степени релевантности определяет также порядок использования неодушевленных источников при разработке ИС, т.е. в первую очередь используются источники знаний с полной и высокой степенью релевантности, а затем со значительной, достаточной и незначительной.

Как правило, источники знаний, у которых  $a_i < 0.15$ , использовать для извлечения знаний нецелесообразно.

### 5. Квалиметрический метод определения источников знаний и его применение

Как известно [26-29], любой предмет обладает практически бесконечным количеством свойств, составляющих в целом его качество. Но из этого бесконечного количества для характеристики качества предмета необходимо выделить лишь те свойства, которые в данный момент представляют интерес с точки зрения удовлетворения предъявляемым требованиям. Рассмотрим этот подход применительно к источникам знаний.

Чтобы источник знаний можно было выбрать для использования при создании ИС, он должен обладать вполне определенным набором соответствующих свойств, которые составляют качество источника знаний. В этом случае качество будет являться его интегральной характеристикой, на основании оценки которой осуществляется выбор в интересах создания ИС:

$$K = f(C_1, \dots, C_n, V_1, \dots, V_n), \text{ где}$$

$K$  - качество источника знаний;

$f$  - функция интегральной оценки;

$C_1, \dots, C_n$  - свойства, составляющие качество источника знаний;

$V_1, \dots, V_n$  - веса свойств  $C_1, \dots, C_n$ , соответственно;

$n$  - количество указанных свойств.

Для оценки качества применяются методы квалиметрии [26-29], основанные на сравнении с эталоном. Под эталоном будем понимать источник знаний «идеального» (максимального) качества, т.е. с наилучшими показателями свойств в смысле целевого назначения:

$$K_{\text{э}} = f(C_{1\text{э}}, \dots, C_{n\text{э}}, V_{1\text{э}}, \dots, V_{n\text{э}}) = \max.$$

Тогда количественная оценка будет представлять собой некоторую функцию соотношения (соответствия) показателя качества рассматриваемого предмета (источника знаний в нашем случае) к показателю качества предмета, принятого за эталон:

$$G = g(K, K_{\text{э}}), \text{ где}$$

$g$  - функция соотношения;

$K$  - качество предмета;

$K_{\text{э}}$  - качество эталона.

Следует отметить, что в соответствии с принципами квалиметрии сумма весов свойств, составляющих качество, есть величина постоянная и, как правило, принимается равной единице:

$$\sum_{i=1}^n V_i = 1$$

Тогда вес любого свойства заключен в интервале:  $0 \leq V_i \leq 1$ . При оценке качества веса выделенных свойств оцениваемого источника знаний и эталона должны быть равны:  $V_i = V_{i\text{э}}, i=1, \dots, n$ .

Исходя из сказанного, предлагается алгоритм оценки качества источника знаний, который в общем виде будет выглядеть следующим образом:

1. Выделяются соответствующие свойства  $C_i$  источника знаний,  $i=1, \dots, n$ .

2. Задаются веса  $V_i, i=1, \dots, n$  выделенных свойств.

3. Задаются наилучшие значения выделенных свойств.

4. Определяется качество эталона с учетом функции интегральной оценки.

5. Определяются значения выделенных свойств для рассматриваемого источника знаний.

6. Определяется качество рассматриваемого источника знаний.

7. С учетом функции соотношения осуществляется оценка качества источника знаний.

При задании значений свойств и оценке качества используются различные шкалы, например, балльных оценок или оценочных коэффициентов [26-29].

*Рассмотрим действие алгоритма при оценке качества экспертов.*

1. Для одушевленных источников знаний (экспертов), используемых при создании ИС, целесообразно выделить следующие свойства:

- компетентность ( $C_1$ ) - квалификация эксперта в предметной области;

- креативность ( $C_2$ ) - способность решать задачи, метод решения которых полностью или частично неизвестен;

- эвристичность ( $C_3$ ) - способность выявлять неочевидные проблемы;

- интуиция ( $C_4$ ) - способность угадывать решение без его обоснования;

- предикатность ( $C_5$ ) - способность предсказывать или предчувствовать будущее решения;

- независимость ( $C_6$ ) - способность противостоять мнению большинства;

- всесторонность ( $C_7$ ) - способность видеть проблему с разных точек зрения;

- коммуникабельность ( $C_8$ ) - способность к общению с другими лицами;

- умение изложить мысли ( $C_9$ ) - способность к вербальному и (или) изобразительному представлению мысленных образов (моделей).

2. На основе применения метода экспертных оценок, установим выделенным свойствам следующие веса:

$$V_1 = 0.2, V_2 = 0.05, V_3 = 0.1, V_4 = 0.1, V_5 = 0.05, V_6 = 0.15, V_7 = 0.1, V_8 = 0.15, V_9 = 0.1.$$

3. Значения выделенных свойств определяем на основе шкалы оценочных показателей из интервала  $[0;1]$ . Следовательно, наилучшие значения свойств:  $C_{i\text{э}}=1, i=1, \dots, 9$ .

4. При интегральной оценке качества эксперта воспользуемся функцией следующего вида:

$$K = \sum_{i=1}^n V_i C_i$$

Тогда качество эталонного эксперта:

$$K_{\text{э}} = \sum_{i=1}^9 V_i C_{i\text{э}} = 1$$

5. Пользуясь шкалой оценочных показателей из интервала [0,1], с помощью метода экспертных оценок определяем значения свойств  $C_i$ ,  $i=1,9$  конкретного рассматриваемого эксперта. Очевидно, что чем сильнее проявляется свойство, тем больше значение коэффициента.

6. Определяется качество рассматриваемого эксперта:

$$K = \sum_{i=1}^9 V_i C_i$$

7. Оцениваем качество эксперта, используя функцию соотношения следующего вида:

$$g(K, K_{\text{э}}) = K_{\text{э}} / K$$

Тогда оценка качества осуществляется на основе неравенства:  $1 \leq K_{\text{э}} / K \leq d$ , где  $d > 1$  - некоторое заданное число.

Для нашего случая установим  $d=2$ , следовательно, получим:  $1 \leq K_{\text{э}} / K \leq 2$ . Таким образом, для создания ИС целесообразно выбирать такого эксперта, качество которого оценивается не меньше чем половина значения качества идеального эксперта,  $K \geq K_{\text{э}} / 2$ .

*Покажем действие алгоритма при оценке качества неодушевленных источников знаний.*

1. Для неодушевленных источников знаний целесообразно выделить следующие свойства:

- релевантность (S1) - соответствие ключевых слов и образов семантике предметной области;
- рекомендуемость (S2) - частота рекомендаций экспертами для использования при создании БЗ;
- прагматичность (S3) - направленность на конкретное практическое использование в предметной области;
- структурность (S4) - наличие эксплицитной (явной) структуры содержимого источника знаний;
- наглядность (S5) - визуальная воспринимаемость содержимого источника знаний.

2. На основе метода экспертных оценок установим выделенным свойствам следующие веса:  $V_1=0.5$ ,  $V_2=0.2$ ,  $V_3=0.1$ ,  $V_4=0.1$ ,  $V_5=0.1$ .

3. Значения выделенных свойств определяем на основе пятибалльной шкалы. Следовательно, наилучшие значения свойств:  $S_{i\text{э}} = 5$ ,  $i=1, \dots, 5$ .

4. При интегральной оценке качества используем функцию вида:

$$K = \sum_{i=1}^n V_i S_{i\text{э}}$$

Тогда качество эталона:

$$K_{\text{э}} = \sum_{i=1}^5 V_i S_{i\text{э}} = 1$$

5. Пользуясь пятибалльной шкалой, с помощью метода экспертных оценок определяем значения свойств  $S_i$ ,  $i=1, \dots, 5$  конкретного рассматриваемого неодушевленного источника знаний. Очевидно, что чем полнее выражено свойство, тем выше присваиваемая балльная оценка.

6. Определяется качество рассматриваемого источника знаний:

$$K = \sum_{i=1}^5 V_i S_i$$

7. Оцениваем качество неодушевленного источника знаний, используя функцию соотношения вида:  $g(K, K_{\text{э}}) = K_{\text{э}} - K$ .

Тогда оценка качества осуществляется на основе неравенства:  $0 \leq (K_{\text{э}} - K) \leq p$ , где  $p > 0$  - некоторое заданное число.

Для нашего случая установим  $p = 2.5$ , следовательно, получим:  $0 \leq (K_{\text{э}} - K) \leq 2.5$ .

Таким образом, для создания ИС целесообразно выбирать такие неодушевленные источники знаний, качество которых отличается от значения качества эталона не более чем на 2.5 балла (в случае использования пятибалльной шкалы).

Следует отметить, что квалиметрический метод определения источников знаний требует значительной подготовки, дополнительных сил, средств и времени, и в конечном итоге может превратиться в отдельное исследование.

### Заключение

В данной статье представлены методы выявления знаний, разработанные и примененные при создании ИС, обеспечивающих процессы поддержки принятия решений по управлению большими сложными динамическими системами, такими как морской порт [30], интегрированная система управления судном [31], система транспортной логистики в цепях поставок [32] и др. Применение рассмотренных методов, в рамках технологии создания элементов ИС, позволило обеспечить выполнение требований по качеству и эффективности, установленных в соответствующих нормативно-регламентирующих документах заказчиков, а также снизить расходы разработчиков на привлечение необходимых для создания ИС ресурсов [30-32].

Следует отметить, что в настоящее время ключевым условием, определяющим возможность использования ИС при выполнении сложных ответственных задач, является доверие к таким системам. Очевидно, что бессмысленно тратить ресурсы и создавать ИС, функционирование которых непонятно и вызывает опасение у человека. Это связано с тем, что ошибки при решении указанных задач могут привести к тяжким последствиям, несущим угрозу жизни и здоровью людей, серьезному экономическому и экологическому ущербу. Доверие к ИС — уверенность всех заинтересованных сторон, и в первую очередь потребителей, в том, что система способна выполнять возложенные на нее задачи с требуемыми качеством и эффективностью. Успешная реализация этапа выявления знаний в процессе создания ИС позволяет в значительной степени обеспечить высокий уровень такого доверия. Необходимо отметить, что привлечение к проекту «внешних» независимых экспертов, несмотря на определенное увеличение затрат, позволяет повысить уровень доверия еще больше.

Используя представленные методы выявления знаний, как в отдельности, так и в определенной комбинации, в итоге получаем множество источников знаний, которые содержат релевантную информацию, необходимую для успешного решения задач. Ясно, что методы выявления знаний различаются между собой по точности, достоверности, глубине проработки. Выбор и

применение того или иного метода зависит от конкретной решаемой задачи и наличия соответствующих ресурсов организационно-технологического исполнения.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку новых и совершенствование существующих методов по

выявлению знаний, исследование и формализацию новых условий, которым должны удовлетворять выбираемые источники знаний, разработку обобщенного показателя релевантности источников знаний исследуемому фрагменту предметной области ИС.

### Литература

1. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ: учебник для бакалавров. М., Юрайт, 2012, 679 с.
2. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учеб.пособие для вузов. Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М., Высшая школа, 2004, 616 с.
3. Антонов А.В. Системный анализ. М., Высшая школа, 2004, 457с.
4. Моделирование систем и процессов: учебник для академического бакалавриата. Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. — М., Юрайт, 2014, 592 с.
5. Гаврилова Т.А., Муромцев Д.И., Кудрявцев Д.В. Инженерия знаний. Модели и методы. Издательство: Лань, 2020, 324с.
6. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. Издательство: Питер, 2003, 384с.
7. Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных систем. М.: Финансы и статистика, ИНФРА-М, 2010г., 432 с.
8. Рыбина Г.В. Проектирование систем, основанных на знаниях. М.: МИФИ, 2000г., 100 с.
9. Рыбина Г.В. Обучающие интегрированные экспертные системы: некоторые итоги и перспективы. Искусственный интеллект и принятие решений. № 1, 2008г., с.22-46.
10. Maier, R. Knowledge Management Systems: Information And Communication Technologies for Knowledge Management (3rd ed.). Berlin, Springer, 2007, ISBN 9783540714088.
11. John Davies, Marko Grobelnik, Dunja Mladenić. Semantic Knowledge Management. Berlin, Springer, 2009, ISBN 9783540888444.
12. Rao, Madanmohan. Knowledge Management Tools and Techniques. Amsterdam; Boston, Elsevier, 2005, ISBN 9780750678186.
13. N. P. Padhy. Artificial Intelligence and Intelligent Systems (1st ed.). Oxford University Press, 2005, ISBN 9780195671544.
14. Michael Negnevitsky. Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems. (3rd ed.). Pearson Canada, 2011, ISBN 9781408225745.
15. Галашев В.А. Системы поиска и обработки информации: Учеб.-метод. пособие. Ижевск: Удм. гос. ун-т., 2011. — 149 с.
16. Джарратано Д., Райли Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование / М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2007. 1152 с.
17. Никандров В. В. Вербально-коммуникативные методы в психологии. — СПб.: Речь, 2002г., 72с.
18. Валеев Г.Х. Методология и методы психолого-педагогических исследований. Стерлитамак. гос. пед. ин-т, 2002г., 134 с.
19. Болюбаш Я.Я., Булах И., Мруга М.Г., Филончук И.Ф. Педагогическое оценивание и тестирование. Правила, стандарты, ответственность. Научное издание. — К.: Мастер-класс, 2007. — 272 с.
20. Воронина И.Е. и др. Функциональный подход к выделению ключевых слов: методика и реализация. Вестник Воронежского государственного университета. 2009г., № 1, С. 68-72.
21. Воронина И.Е., Кретов А.А., Попова И.В. Алгоритмы определения семантической близости ключевых слов по их окружению в тексте. Вестник Воронежского государственного университета. 2010г., № 1, С.148-153.
22. Гринева М., Гринева М. Анализ текстовых документов для извлечения тематически сгруппированных ключевых терминов. Труды Института системного программирования РАН. 2009. Т.16. С. 155–165.
23. Rose S., Engel D., Cramer N., Cowley W. Automatic Keyword Extraction from Individual Documents. Text Min. Appl. Theory. 2010. pp. 1–20.
24. Zhang C., Wang H., Liu Y., Wu D., Liao Y., Wang B. Automatic Keyword Extraction from Documents Using Conditional Random Fields. J. Comput. Inf. Syst. 2008. Vol. 4. pp. 1169–1180.
25. Ванюшкин А.С., Гращенко Л.А. Методы и алгоритмы извлечения ключевых слов. Новые информационные технологии в автоматизированных системах. №19, 2016, с.85-93.
26. Варжапетян А.Г. Квалиметрия: учебное пособие. — СПб.: СПбГУАП, 2005. — 176 с.
27. Гличев А.В. Основы управления качеством продукции. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: РИА «Стандарты и Качество», 2001. — 424 с.
28. Прохоров Ю.К. Управление качеством. СПб.: СПбГУИТМО, 2007. — 144 с.
29. Субетто А.И. Квалиметрия. СПб.: Издательство «Астерион», 2002. — 288 с.
30. Дорошенко В.И., Ильин А.А., Искандеров Ю.М. Проблемы автоматизации управления корпоративной сетью связи морского порта. Эксплуатация морского транспорта. 2009, № 3 (57), с. 9-14.
31. Искандеров Ю.М., Гаскаров В.Д., Дорошенко В.И. Мультиагентная модель интегрированной системы управления судном. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2019, Т. 11, № 5, с. 831-841.
32. Искандеров Ю.М., Свистунова А.С., Хасанов Д.С., Чумак А.С. Интеллектуальная поддержка принятия решений в логистических системах. Морские интеллектуальные технологии. 2021, Т.1, № 2 (53), с. 145-153.

## References

1. Volkova V.N., Denisov A.A. Systems theory and systems analysis: a textbook for bachelors. M., Yurayt, 2012, 679 p.
2. System analysis and decision-making: Dictionary-reference book: Textbook for universities. Ed. V.N. Volkova, V.N. Kozlov. M., Higher school, 2004, 616 p.
3. Antonov A.V. System analysis. M., Higher School, 2004, 457p
4. Modeling of systems and processes: a textbook for an academic undergraduate degree. Ed. V.N. Volkova, V.N. Kozlov. - M., Yurayt Publishing House, 2014, 592 p.
5. Gavrilova T.A., Muromtsev D.I., Kudryavtsev D.V. Knowledge engineering. Models and Methods. Publisher: Lan, 2020, 324p.
6. Gavrilova T.A. Khoroshevsky V.F. Knowledge base of intelligent systems. Publisher: Peter, 2003, 384p.
7. Rybina G.V. The basics of building intelligent systems. M.: Finance and statistics, INFRA-M, 2010, 432 p.
8. Rybina G.V. Knowledge systems design. Moscow: MEPhI, 2000, 100 p.
9. Rybina G.V. Learning integrated expert systems: some results and perspectives. Artificial intelligence and decision making. No. 1, 2008, pp. 22-46.
10. Maier, R. Knowledge Management Systems: Information And Communication Technologies for Knowledge Management (3rd ed.). Berlin, Springer, 2007, ISBN 9783540714088.
11. John Davies, Marko Grobelnik, Dunja Mladenić. Semantic Knowledge Management. Berlin, Springer, 2009, ISBN 9783540888444.
12. Rao, Madanmohan. Knowledge Management Tools and Techniques. Amsterdam; Boston, Elsevier, 2005, ISBN 9780750678186.
13. N. P. Padhy. Artificial Intelligence and Intelligent Systems (1st ed.). Oxford University Press, 2005, ISBN 9780195671544.
14. Michael Negnevitsky. Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems. (3rd ed.). Pearson Canada, 2011, ISBN 9781408225745.
15. Galashev V.A. Information search and processing systems. Izhevsk: Udm. state un-t., 2011. -- 149 p.
16. Jarratano D., Riley D. Expert systems: development principles and programming. M., LLC "I.D. Williams ", 2007, 1152 p.
17. Nikandrov V. V. Verbal and communicative methods in psychology. SPb., Speech, 2002, 72 p.
18. Valeev G.Kh. Methodology and methods of psychological and pedagogical research. Sterlitamak. state ped. Institute, 2002, 134 p.
19. Boliubash Ya.Ya., Bulakh I., Mruga M.G., Filonchuk I.F. Pedagogical assessment and testing. Rules, standards, responsibility. K., Master class, 2007, 272 p.
20. Voronina I.E. and others. Functional approach to the selection of keywords: methodology and implementation. Voronezh State University Bulletin. 2009, No. 1, pp. 68-72.
21. Voronina I.E., Kretov A.A., Popova I.V. Algorithms for determining the semantic proximity of keywords by their environment in the text. Voronezh State University Bulletin. 2010, No. 1, pp. 148-153.
22. Grineva M., Grinev M. Analysis of text documents to extract thematically grouped key terms. Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences. 2009. Vol.16. S. 155-165.
23. Rose S., Engel D., Cramer N., Cowley W. Automatic Keyword Extraction from Individual Documents. Text Min. Appl. Theory. 2010. pp. 1–20.
24. Zhang C., Wang H., Liu Y., Wu D., Liao Y., Wang B. Automatic Keyword Extraction from Documents Using Conditional Random Fields. J. Comput. Inf. Syst. 2008. Vol. 4. pp. 1169–1180.
25. Vanyushkin A.S., Grashchenko L.A. Methods and algorithms for extracting keywords. New information technologies in automated systems. No. 19, 2016, p. 85-93.
26. Varzhapetyan A.G. Qualimetry: a tutorial. - SPb.: SPbGUAP, 2005. -- 176 p.
27. Glichev A.V. Fundamentals of product quality management. 2nd ed., Rev. and add. - M.: RIA "Standards and Quality", 2001. - 424 p.
28. Prokhorov Yu.K. Quality control. SPb.: SPbGUITMO, 2007. -- 144 p.
29. Subetto A.I. Qualimetry. SPb.: Publishing house "Asterion", 2002. - 288 p.
30. Doroshenko V.I., Ilyin A.A., Iskanderov Yu.M. Problems of automation of management of the corporate communication network of the seaport. Operation of sea transport. 2009, No. 3 (57), p. 9-14.
31. Iskanderov Yu.M., Gaskarov V.D., Doroshenko V.I. Multi-agent model of an integrated ship control system. Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov. 2019, vol. 11, no. 5, p. 831-841.
32. Iskanderov Yu.M., Svistunova A.S., Khasanov D.S., Chumak A.S. Intelligent decision support in logistics systems. Marine Intelligent Technologies. 2021, Vol. 1, No. 2 (53), p. 145-153.



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

**Юрий Марсович Искандеров**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией интеллектуальных систем, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., дом 39, e-mail: iskanderov\_y\_m@mail.ru

**Yury M. Iskanderov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Head of the Laboratory of Intelligent Systems, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 199178, Russia, Saint Petersburg, 14 Liniya V. O., 39, e-mail: iskanderov\_y\_m@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.11.2021; одобрена после рецензирования 09.12.2021, принята к публикации 15.01.2022.

The article was submitted 15.11.2021; approved after reviewing 09.12.2021; accepted for publication 15.01.2022.

Научная статья

УДК 504.062

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.015>

## Предложения по разработке интеллектуальной системы управления экологической безопасностью Северного морского пути

И.Г. Малыгин<sup>1,2</sup> malygin\_com@mail.ru, Е.Ю. Кузнецова<sup>1</sup> helhena@mail.ru

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук,

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

**Аннотация.** Приведено обоснование необходимости создания в районах тяготения к Северному морскому пути Интеллектуальной системы управления экологической безопасности, которая должна стать основой создания Комплексной Интеллектуальной системы экологической безопасности перспективной интеллектуальной мультимодальной транспортной системы Арктической зоны Российской Федерации. Определена концепция реализации предложений, заключающаяся в использовании мультимодального транспортного коридора в качестве платформы сбора данных и встраивании в его инфраструктурные и подвижные объекты экологических датчиков и исполнительных устройств. Разработана трехуровневая архитектура системы экологической безопасности, состоящая из когнитивного, информационного и физического слоев, определены наборы операций для каждого уровня. Обосновано, что Интеллектуальная система экологической безопасности перспективной интеллектуальной мультимодальной транспортной системы Арктической зоны Российской Федерации может стать основой для создания комплексной программы экологического регулирования региона в целом. Установлены перспективные направления исследований по обозначенной тематике.

**Ключевые слова:** мониторинг, экология, безопасность, Арктика, интеллектуальная система, мультимодальный транспорт, транспортный коридор, Северный морской путь.

**Для цитирования:** Малыгин И.Г., Кузнецова Е.Ю. Предложения по разработке интеллектуальной системы управления экологической безопасностью Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 121—127

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.015>

## Proposals for development of intelligent environmental safety management system for the Northern Sea Route

Igor G. Malygin<sup>1,2</sup> malygin\_com@mail.ru, Elena Y. Kuznetsova<sup>1</sup> helhena@mail.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

**Abstract.** The necessity of creating an intelligent system of management environmental safety of the Northern Sea Route is substantiated. It should be the basis of a Comprehensive Intelligent Environmental Safety System of a promising intelligent multimodal transport system of the Arctic zone of the Russian Federation. The concept is to use a multimodal transport corridor as a data collection platform and embed environmental sensors and actuators into its infrastructure and mobile facilities. A three-level architecture of the environmental safety system has been developed, consisting of cognitive, informational and physical layers, and sets of operations for each level have been defined. It is proved that the Intelligent Environmental Safety System of the promising intelligent multimodal transport system of the Arctic zone of the Russian Federation can become the basis for creating a comprehensive environmental regulation program in the region as a whole. Promising directions of research on the designated topic have been established.

**Key words:** monitoring, ecology, safety, Northern Sea Route, intelligent system, multimodal transport corridor, Arctic zone.

**For citation:** Igor G. Malygin, Elena Y. Kuznetsova, Proposals for development of intelligent environmental safety management system for the Northern Sea Route // Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 121—127

### Введение

Активное промышленное освоение богатств Арктической зоны Российской Федерации (АЗ РФ) ведет к усилению негативного воздействия на природную среду акватории Северного морского пути (СМП). Увеличение числа рейсов судов по СМП, связанных с добычей углеводородного сырья и других полезных ископаемых, доставкой грузов для снабжения северных районов страны (северный завоз), арктическим туризмом и др., повышают риск

загрязнения природной среды Арктики, которая пока еще менее загрязнена, чем другие районы мира.

Для транспортной системы СМП характерны высокие риски при судоходстве из-за узких и мелководных проливов, сложных ледовых и погодных условий и др. В этой связи важно знать, каким образом развитие судоходства по СМП, и особенно массовая перевозка углеводородного сырья, влияет на экосферу АЗ РФ и какие меры нужно предпринять для снижения рисков загрязнения окружающей среды.

Развитие российской Арктической зоны закреплено на высшем государственном уровне в качестве приоритетной задачи экономического развития и обеспечения национальной безопасности. Утвержден План развития инфраструктуры СМП на период до 2035 года [1], приняты Основы государственной политики России в Арктике на период до 2035 года [2] и Стратегия развития и обеспечения национальной безопасности АЗ РФ до 2035 года [3]. Эти документы формируют нормативно-правовую базу, основные положения которой предусматривают развитие современных арктических транспортных средств и транспортной инфраструктуры, обеспечение комплексной безопасности, повышение социально-экономического уровня населения при обеспечении подходов устойчивого развития региона в процессе освоения его природных ресурсов.

Целью данной статьи является разработка предложений по созданию интеллектуальной системы управления экологической безопасностью для СМП.

### **Арктический интеллектуальный мультимодальный транспортный коридор – платформа сбора экологических данных**

Сегодня предпринимаются активные действия по реализации большинства основных федеральных арктических проектов. Широкомасштабное освоение арктических ресурсов безусловно предполагает решение задач создания единой транспортной системы АЗ РФ, развития и совершенствования ее инфраструктуры.

В планах экономического развития – навигационное и логистическое оснащение СМП, грузопоток по которому к 2024 г., согласно указу Президента РФ от 7 мая 2018 г. №204 [4], должен составить 80 млн тонн. Планируется строительство новой техники: до 2024 г. – ввод в эксплуатацию одного головного и трех серийных универсальных атомных ледоколов проекта 22220, шестнадцати судов аварийно-спасательного и вспомогательного флота, тринадцати судов навигационно-гидрографического обеспечения. Продолжит развиваться портовая инфраструктура, запланированы строительные и реконструкционные работы в морских портах АЗ РФ [5].

Динамичные изменения в Арктическом регионе создают не только дополнительные возможности, но и новые вызовы и риски: геополитические, природные, военные, техногенные и биолого-социальные, что диктует необходимость обеспечения комплексной безопасности.

Сегодня реализуется программа развития Арктических комплексных аварийно-спасательных центров МЧС России, что повышает уровень защищенности населения и территорий [6].

Существенным фактором стабильного развития АЗ РФ является уменьшение антропогенной нагрузки на окружающую среду, обеспечение которого возможно при условии создания комплексной программы экологического регулирования. Подобная программа должна включать и традиционный промышленный экологический мониторинг и инновационное внедрение отраслевых наилучших доступных технологий, но ее основой должна стать интеллектуальная система экологической безопасности (ИСЭБ), интегрированная в инфраструктуру интеллектуальной мультимодальной транспортной системы (ИМТС) АЗ РФ [7].

Важнейший этап пространственного развития России в Арктике – это полномасштабное освоение акватории Северного морского пути и территорий, тяготеющих к нему. И создание системы экологической безопасности АЗ РФ, интегрированной в инфраструктуру разрабатываемого Арктического интеллектуального мультимодального транспортного коридора (АИМТК) РФ (рисунок 1), должно стать важнейшим элементом сопровождения всех процессов, связанных с освоением Арктики, включая, сам транспорт, добычу полезных ископаемых, индустрию, жизнь и быт населения [8].

Технология построения ИСЭБ для СМП предполагает встраивание во все ключевые транспортные инфраструктурные и частично в подвижные объекты АЗ РФ экологических датчиков и исполнительных устройств, при этом информационно-телекоммуникационная сеть АИМТК будет являться платформой динамичного сбора экологических данных в реальном масштабе времени.

Для осуществления эффективного экологического мониторинга с помощью транспортных средств и объектов транспортной инфраструктуры, необходимо, чтобы собранные данные с экологических датчиков транспортного средства передавались и обрабатывались в базах экологических данных системы экологического прогнозирования на крупных транспортно-логистических узлах. Такая технология в ИПТ РАН в настоящее время частично реализована: разработаны модели и методы интеллектуального мониторинга и прогнозирования негативного воздействия на окружающую среду двух видов транспорта в крупных городах-портах [9]. Архитектурная модель мониторинга состоит из трех уровней (когнитивного, информационного и физического), на каждом выполняется определенные виды операций. Данная система позволяет оценивать управляющее воздействие, направленное на минимизацию негативного воздействия транспорта на окружающую среду.



Рис.1 – Арктический интеллектуальный мультимодальный транспортный коридор

Концепция ИСЭБ предполагает встраивание в подвижные и инфраструктурные транспортные объекты АЗ РФ экологических датчиков и исполнительных устройств, передачу информации для последующей интеллектуальной обработки в центр управления ИСЭБ. Разработаны дальнейшие направления исследований методологических и практических аспектов реализации концепции, ее интеграции в перспективную систему экологического мониторинга РФ с учетом возможности применения разработок отечественной промышленности [10]. Создание ИСЭБ для АЗ РФ позволит проводить анализ состояния окружающей среды и оценивать экологическую безопасность функционирования сложных промышленных систем, прогнозировать последствия ведения промышленно-хозяйственной деятельности, внедрения новых инфраструктурных проектов. Технология может быть транслирована и на другие регионы РФ.

Разработанная архитектура ИСЭБ для СМП (представлена на рисунке 2), может стать основой для создания Комплексной (глобальной) ИСЭБ ИМТС АЗ РФ. Архитектурная модель имеет трехуровневый вид:

- на физическом уровне рассматриваются различные стационарные и мобильные датчики мониторинга загрязнения – *подсистема мониторинга и сбора экологических данных*;
- на информационном уровне присутствуют базы данных, различные расчетные модели, цифровые двойники и облачные ресурсы и формируются цифровые цепи физических объектов – *подсистема хранения и обработки экологических данных*;
- на третьем – когнитивном уровне – собирается информация от различных объектов и органов

управления (ведомственных и территориальных) с целью оценки управляющих воздействий, направленных на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду – *подсистема управления ИСЭБ*.

#### Современные средства и технологии обеспечения функционирования системы комплексной экологической безопасности СМП

Теоретические, методологические и практические аспекты реализации проектов такого масштаба как ИСЭБ СМП, и тем более Комплексной (глобальной) ИСЭБ ИМТС АЗ РФ, предполагают участие коопераций организаций, занимающихся научной и производственной деятельностью. Сегодня по инициативе Комитета Санкт-Петербурга по делам Арктики создан научно-производственный арктический кластер, в состав которого входят 24 научно-исследовательских и производственных организации, которые на протяжении двух лет разрабатывают, планируют и аккумулируют свои проекты для Арктики [13].

Снизить антропогенную нагрузку на экологию СМП позволит активное применение беспилотных технологий в АЗ РФ. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 5 декабря 2020 № 2031 «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации» будут проводиться испытания беспилотных судов в 11 субъектах страны, в том числе в Мурманской, Магаданской, Сахалинской областях и Приморском крае [11].



Рис. 2 – Архитектура интеллектуальная система экологической безопасности для Северного морского пути

Предполагается, что за счёт внедрения беспилотных судов сократится число морских аварий, т.к. до 90% происшествий происходит из-за «человеческого фактора». Также судовладельцы смогут сократить до 15-30% операционных затрат, что позволит покрыть дефицит высококвалифицированных моряков, который сейчас достигает 20% от требуемого количества работников. Однако полностью автономными суда быть не могут, поскольку установленное оборудование требует постоянного контроля специалистов.

Для широкого использования беспилотных воздушных, наземных и морских транспортных технологий в Арктической зоне России необходимо наличие постоянного информационно-телекоммуникационного трафика, обеспечить

который в условиях высоких широт в населенных пунктах, на морских коммуникациях и портах СМП в полной мере могут только спутники связи [12].

Значительный вклад в решение проблемы снижения негативного воздействия на морскую среду внесет внедрение в состав объектов арктических транспортно-логистических узлов судовых экологических комплексов. Эти, относительно новые средства мониторинга, положительно зарекомендовали себя при эксплуатации в акваториях различных регионов РФ, применяются для контроля уровня и характеристик загрязненности природных поверхностных вод и донного грунта, оконтуривания зон загрязнения, получения информации для определения причин загрязнения и их источников.

Таблица 1

**Система контроля параметров водной среды в приповерхностном и придонном слоях**

| Физические и химические параметры          | Диапазон измерения   | Погрешность                                |
|--|----------------------|--|
| Температура, о С                           | 0 – 35               | ±0,1оС                                     |
| Удельная электропроводимость, См/м         | 5 – 200<br>50 – 2000 | ±6% от текущего зн.<br>±3% от текущего зн. |
| Концентрация растворенного кислорода, мг/л | 0 – 15               | ±5% от текущего значения                   |
| Концентрация ионов водорода, ед. рН        | 2 – 12               | ±0,1 ед. рН                                |
| Окислительно-восст. потенциал, мВ          | -700 – 1200          | ±10 мВ                                     |
| Гидростатическое давление, МПа             | 0 – 0,3              | ± 0,02 МПа                                 |

Таблица 2

Гидрохимическая лаборатория экспрессного непрерывного измерения концентрации вещества

| Контролируемые показатели        | Диапазон измерения концентрации загрязняющего вещества |              | Погрешность, %          | При концентрации загрязняющего вещества, мг/л |
|----------------------------------|--|--------------|-------------------------|---|
|                                  | Пресная вода   | Соленая вода |                         |   |
| Нитрат-ион, мг/л                 | 0,05 – 1,0   |              | ±25 С                   | -   |
| Нитрат-ион, мг/л                 | 0,3 – 0,5  |              | ±20 С<br>±15 С          | 0,3 – 3,0<br>более 3,0                        |
| Фосфат-ион, мг/л (пересчет на Р) | 0,05 – 1,0   | 0,05 – 0,99  | ±15 С<br>±10 С          | 0,05 – 0,5<br>более 0,5                       |
| Аммоний ион, мг/л                | 0,05 – 0,8   | 0,1 – 0,8    | ±50 С<br>±25 С<br>±10 С | 0,05 – 0,1<br>0,1 – 0,5<br>более 0,5          |
| Медь-ион, мг/л                   | 0,001 – 0,02   | 0,001 – 0,02 | ±50 С<br>±25 С          | 0,001 – 0,01<br>более 0,01                    |
| Железо-ион, мг/л                 | 0,05 – 1,0   |              | ±20 С                   |   |
| Сульфат-ион, мг/л                | 25 – 250   |              | ±20 С                   | 25 – 100<br>более 100                         |
| Цветность, град                  | 5 – 70°  |              | ±50 С<br>±10 С          | 5 – 10°<br>более 10°                          |

Примечание – С – измеренное значение концентрации контролируемого компонента.

В таблицах 1 и 2 приведены гидрофизические и гидрохимические показатели состояния водной среды измеряемые в режиме онлайн с геопозиционированием судовым комплексом ВМФ [14]. Результаты измерений используются в основных методиках оценки нагрузки на водную экосистему в зонах ответственности ВМФ. В состав комплексов входит набор оборудования для осуществления экологического контроля, результаты работы которого используются для проведения оценок по методикам оперативного и долгосрочного прогнозирования с целью разработки мероприятий по обеспечению экологической безопасности и снижению негативного воздействия различных видов техносферной деятельности.

Применение специального аппаратного оснащения судовых комплексов в сочетании с особой методологией работ, учитывающей особенности природной зоны, позволит достичь высокого уровня оперативного контроля состояния акваторий портовых зон СМП.

Стоит рассматривать идею создания ИСЭБ ИМТС АЗ РФ на базе АИМТК как флагманский, масштабный проект в рамках деятельности по достижению сразу нескольких Целей устойчивого развития, который будет включать в себя подпроекты для реализации отдельных направлений. В связи с чем, сегодня в рамках деятельности ИПТ РАН в составе Арктического научно-производственного кластера Санкт-Петербурга, проводится углубленное исследование по оценке эффективности применения в составе ИСЭБ ИМТС СМП разработок науки и промышленности, выполняемых в последние годы для арктических широт.

**Заключение**

Существенным фактором стабильного развития АЗ РФ является уменьшение антропогенной нагрузки

на окружающую среду, обеспечение которой возможно при условии создания комплексной программы экологического регулирования в регионе. Принципиальный подход к созданию такой системы должен учитывать различные аспекты решения задачи снижения негативного воздействия на окружающую среду, а именно: традиционные биосферный и промышленный экологический мониторинг, их совершенствование за счет использования перспективных технологий сбора и обработки данных, внедрение отраслевых наилучших доступных технологий. А основой региональной комплексной системы экологического регулирования может стать ИСЭБ СМП, интегрированная в инфраструктуру ИМТС АЗ РФ, что обусловлено тесной связью между развитием региона и его транспортной инфраструктуры. Использование ИМТС в качестве платформы сбора экологических данных позволит, кроме контроля воздействия транспорта на экосистему, контролировать адекватность данных, получаемых от других субъектов техносферной деятельности, актуализировать метеорологические данные, представлять оперативные данные при чрезвычайных ситуациях.

Создание ИСЭБ для СМП позволит не только проводить анализ существующего состояния окружающей среды и оценивать экологическую безопасность функционирования сложных промышленных систем в российской Арктике, но и прогнозировать будущие последствия от ведения промышленно-хозяйственной деятельности в контролируемых районах, прогнозировать состояние окружающей среды при внедрении или отказе от осуществления какого-либо сложного инфраструктурного проекта.

**Литература**

1. Распоряжение Правительства РФ № 3120-р от 21.12.2019 г. «Об утверждении плана развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 г.».
2. Указ Президента РФ № 164 от 05.03.2020 г. «Основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2035 г.».
3. Указ Президента РФ № 645 от 26.02.2020 г. «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.».

4. Указ Президента РФ № 204 от 07.05.2018 г. «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 г.».
5. Указ Президента РФ № 474 от 21.07.2020 г. «О национальных целях развития РФ на период до 2030 г.».
6. Малыгин И.Г., Гавкалюк Б.В. Вопросы устойчивого функционирования транспортного комплекса Арктической зоны Российской Федерации при чрезвычайных ситуациях // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика - регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе: сборник трудов Международной научно-практической конференции. 28 окт. 2020 г. СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2020. С. 7-9.
7. 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.
8. Асаул А.Н., Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Аванесов М.Ю. Концептуальные подходы к построению интеллектуальной мультимодальной транспортной системы РФ // Информация и космос. 2016. № 3. С. 8–17.
9. Малыгин И.Г., Гавкалюк Б.В. От Северного морского пути к Арктическому интеллектуальному мультимодальному транспортному коридору Российской Федерации // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2020: материалы Юбилейной международной научно-практической конференции. – СПб.: ИПТ РАН. 2020. Т. 1. С. 09-16.
10. Lozhkina O.V., Malygin I.G., Rogozinsky G.G., Lozhkin V.N., Komashinsky V.I. Smart technologies for decision-support in the management of environmental safety of transportation in big port cities // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 2 (48) V.1. 2020. - pp. 125-133.
11. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.12.2020 № 2031 «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации».
12. Gurlev I.V., Malygin I.G., Makosko A.A., Kaminsky V.Yu. Intellectualization of the transport system of the northern sea route // Marine intellectual technologies. Scientific journal №3(53) V.1. 2021. - pp. 228-235.
13. Комитет Санкт-Петербурга по делам Арктики // <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/arkt/klaster/> дата обращения 01.11.2021 г.
14. Антипов В.В., Байдуков А.К., Бобрович В.Ю., Лобынцев В.В., Кузнецова Е.Ю. Перспективные направления совершенствования системы экологического мониторинга военно-морских баз // Морской Вестник. 2004. №2(30). С 71-74.
15. 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. – М.: ИПТ РАН, 2019. – 465 с.

#### References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF № 3120-r ot 21.12.2019 g. Ob utverzhdenii plana razvitiya infrastruktury Severnogo morskogo puti na period do 2035 g. [On approval of plan of development of the Northern Sea route infrastructure for the period up to 2035].
2. Ukaz Prezidenta RF № 164 ot 05.03.2020 g. Osnovy gosudarstvennoj politiki RF v Arktike na period do 2035 g. [Fundamentals of state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035].
3. Ukaz Prezidenta RF № 645 ot 26.02.2020 g. O Strategii razvitiya Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacionalnoj bezopasnosti na period do 2035 g. [On the strategy of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035].
4. Ukaz Prezidenta RF № 204 ot 07.05.2018 g. O nacionalnyh celyah i strategicheskix zadachah razvitiya RF na period do 2024 g. [On national goals and strategic objectives development of the Russian Federation for the period up to 2024].
5. Ukaz Prezidenta RF № 474 ot 21.07.2020 g. «O nacionalnyh celyah razvitiya RF na period do 2030 g. [On the national development of the Russian Federation for the period till 2030].
6. Malygin I.G., Gavkalyuk B.V. Voprosy ustojchivogo funkcionirovaniya transportnogo kompleksa Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii pri chrezvychajnyh situacijah [Issues of sustainable functioning of the transport complex of the Arctic zone of the Russian Federation in emergency situations] // Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy. Arktika - region strategicheskix interesov: pravovaya politika i sovremennye tehnologii obespecheniya bezopasnosti v Arkticheskom regione: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 28 okt. 2020 g. SPb.: SPbU GPS MChS Rossii, 2020. S. 7-9.
7. Malygin I.G., Gavkalyuk B.V., Kuznecova E.Yu. Intellektualnaya sistema ekologicheskoy bezopasnosti – osnova Arkticheskogo intellektualnogo multimodalnogo transportnogo koridora Rossijskoj Federacii [Intelligent system of ecological security is the basis of the Arctic intelligent multimodal transport corridor of the Russian Federation] // Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2021: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 09-10 noyabrya 2021 g. – SPb.: IPT RAN. Tom 1. S. 8-12.
8. Asaul A.N., Malygin I.G., Komashinskij V.I., Avanesov M.Yu. Konceptualnye podhody k postroeniyu intellektualnoj multimodalnoj transportnoj sistemy RF [Conceptual approaches to the development of intelligent multi-modal transport system of Russia] // Informaciya i kosmos. 2016. № 3. S. 8–17.
9. Malygin I.G., Gavkalyuk B.V. Ot Severnogo morskogo puti k Arkticheskomu intellektualnomu multimodalnomu transportnomu koridoru Rossijskoj Federacii [From the Northern Sea way to the Arctic intelligent multimodal transport corridor of the Russian Federation] // Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2020: materialy Yubilejnoy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – SPb.: IPT RAN. 2020. T. 1. S. 09-16.

10. Lozhkina O.V., Malygin I.G., Rogozinsky G.G., Lozhkin V.N., Komashinsky V.I. Intellektualnye tehnologii dlya podderzhki prinyatiya reshenij v oblasti upravleniya ekologicheskoy bezopasnostyu perevozok v krupnyh portovyh gorodah [Smart technologies for decision-support in the management of environmental safety of transportation in big port cities] // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 2 (48) V.1. 2020. - pp. 125-133.
11. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii № 2031 ot 05.12.2020. O provedenii eksperimenta po opytnoj ekspluatatsii avtonomnyh sudov pod Gosudarstvenny'm flagom Rossijskoj Federacii [On conducting an experiment on pilot operation of autonomous vessels under the State Flag of the Russian Federation].
12. Gurlev I.V., Malygin I.G., Makosko A.A., Kaminsky V.Yu. Intellektualizatsiya transportnoj sistemy Severnogo morskogo puti [Intellectualization of the transport system of the northern sea route] // Marine intellectual technologies. Scientific journal №3(53) V.1. 2021. - pp. 228-235.
13. Komitet Sankt-Peterburga po delam Arktiki [St. Petersburg Committee for Arctic Affairs] // <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/arkt/klaster/data/obrashheniya/01.11.2021> g.
14. Antipov V.V., Bajdukov A.K., Bobrovich V.Yu., Lobynceva V.V., Kuznetsova E.Yu. Perspektivnye napravleniya sovershenstvovaniya sistemy ekologicheskogo monitoringa voenno-morskih baz [Promising directions for improving the environmental monitoring system of naval bases] // Morskoy Vestnik. 2004. №2(30). S 71-74.
15. Makosko A.A., Cyganov V.V., Malygin I.G. i dr. Infrastruktura Sibiri, Dalnego Vostoka i Arktiki. Sostoyanie i tri etapa razvitiya do 2050 goda [Infrastructure of Siberia, the Far East and the Arctic. The state and three stages of development until 2050] – M.: IPT RAN, 2019. – 465 s.

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

**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

**Igor G. Malygin**, professor, Dr. Sci. (Eng), Director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; St. Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, e-mail: malygin\_com@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

**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

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 21.02.2022.



Научная статья

УДК 656.6.058

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.016>

## Оценка эффективности обеспечения экологической безопасности персонала судна

Д.А.Скороходов<sup>1</sup> skorohodda@mail.ru, В.Ю. Каминский<sup>1</sup> Kaminskyvy@yandex.ru,  
Е.Ю. Кузнецова<sup>1</sup> helhena@mail.ru

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

**Аннотация.** В статье изложен алгоритм оценки экологической обстановки на водном транспортном средстве с использованием специального критерия, включающего учёт основных факторов среды обитания экипажа судна: состава воздуха рабочей зоны, освещения, шума, вибрации, характеристик электромагнитного поля, качки. Определены коэффициенты значимости (важности) основных факторов экологической обстановки и их составляющих (подфакторов) в процессе обеспечения экологической безопасности персонала на рабочем месте. Для оценки вклада каждого фактора среды обитания экипажа в рамках экспертной оценки используется наиболее объективный, бинарный, способ. С учётом разнородности факторов экологической обстановки и, соответственно, критериев их оценки, в качестве показателя эффективности предложен критерий максимума аддитивной технической полезности - показатель, который позволяет учесть все виды факторов и их характеристик. Форма критерия обеспечивает однозначную физическую интерпретацию, при которой очевиден вклад каждого фактора в общую оценку предпочтительности. Исследованы различные виды функций технической полезности и определены их конкретные выражения для различных характеристик экологической безопасности, входящих в аддитивный критерий оценки экологической обстановки.

**Ключевые слова:** среда обитания, экипаж, экологическая обстановка, функция полезности, оценка предпочтительности, экспертная оценка

**Для цитирования:** Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Кузнецова Е.Ю. Оценка эффективности обеспечения экологической безопасности персонала судна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 128—132

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.016>

## Assessment of the effectiveness of ensuring the environmental safety of the ship's personnel

Dmitriy A. Skorohodov<sup>1</sup> skorohodda@mail.ru, Valery Yu. Kaminsky<sup>1</sup> Kaminskyvy@yandex.ru,  
Elena Y. Kuznetsova<sup>1</sup> helhena@mail.ru

<sup>1</sup>Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article describes an algorithm for assessing the environmental situation on a water vehicle using a special criterion that includes consideration of the main factors of the crew's habitat: the composition of the working area air, lighting, noise, vibration, electromagnetic field characteristics, pitching. The coefficients of significance (importance) of the main environmental factors and their components (subfactors) in the process of ensuring the environmental safety of personnel at the workplace are determined. To assess the contribution of each factor of the crew's habitat, the most objective, binary method is used as part of an expert assessment. Taking into account the heterogeneity of environmental factors and, accordingly, the criteria for their assessment, the criterion of maximum additive technical utility is proposed as an indicator of efficiency - an indicator that allows the participation of all types of factors and their characteristics. The form of the criterion provides an unambiguous physical interpretation, in which the contribution of each factor to the overall assessment of preference is obvious. Various types of technical utility functions are investigated and their specific expressions for various characteristics of environmental safety included in the additive criterion for assessing the environmental situation are determined.

**Key words:** habitat, crew, environmental situation, utility function, preference assessment, expert assessment

**For citation:** Dmitriy A. Skorohodov, Valery Yu. Kaminsky, Elena Y. Kuznetsova, Evaluation of the effectiveness of ensuring the environmental safety of the ship's personnel, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 128—132

### Введение

Публикации [1–4], посвящённые классификации факторов, влияющих на экологическую безопасность, как экипажа судна, так и водного транспортного средства, а также определяющих экологическую эффективность судоходной компании в целом позволяют подойти к оценке эффективности

обеспечения экологической безопасности судового экипажа.

### Выбор функции для оценки эффективности экологической безопасности экипажа

Как было показано в [1] экологическая оценка среды обитания судового экипажа, применяемая в настоящее время, сложна в реализации и требует

чрезвычайно высокой квалификации экспертов. В рамках решения данной проблемы выполним структурирование факторов, влияющих на условия работы экипажа судна, следующим образом:

- воздух рабочей зоны – первый фактор -  $\Phi_1$ , со следующими характеристиками (подфакторами): газовым составом (ПФ<sub>11</sub>), предельно допустимой концентрацией вредных газов (ПФ<sub>12</sub>), температурой (ПФ<sub>13</sub>) и скоростью движения (ПФ<sub>14</sub>);

- освещение ( $\Phi_2$ ), включающее следующие компоненты: ПФ<sub>21</sub> - система освещения, ПФ<sub>22</sub> - источник света, ПФ<sub>23</sub> - расположение источника света, ПФ<sub>24</sub> - использованные цвета для сигнализации и возможности безошибочного восприятия сигналов на пульте управления;

- шум ( $\Phi_3$ ): уровень звукового давления (ПФ<sub>31</sub>), частота звука (ПФ<sub>32</sub>);

- вибрация ( $\Phi_4$ ): частота (ПФ<sub>41</sub>), виброскорость (ПФ<sub>42</sub>), виброускорение (ПФ<sub>43</sub>);

- электромагнитное поле ( $\Phi_5$ ): электростатическое поле (ПФ<sub>51</sub>), постоянное магнитное поле (ПФ<sub>52</sub>) и электромагнитное поле частотой 50Гц (ПФ<sub>53</sub>);

- качка судна ( $\Phi_6$ ): вертикальные ускорения (ПФ<sub>61</sub>) и боковые перегрузки (ПФ<sub>62</sub>).

Для оценки среды обитания экипажа воспользуемся функцией технической полезности обитаемости рабочего места, которая имеет следующий вид [3]:

$$P = \sum_{i=1}^6 \lambda_i P_i, \quad (1)$$

В рамках анализа эффективности экологической безопасности, с учётом сформированной структуры важных факторов, имеем:

$$\begin{aligned} P_1 &= \sum_{j=1}^4 \lambda_{1j} P_{1j}; P_2 = \sum_{j=1}^4 \lambda_{2j} P_{2j}; \\ P_3 &= \sum_{j=1}^2 \lambda_{3j} P_{3j}; P_4 = \sum_{j=1}^3 \lambda_{4j} P_{4j}; \\ P_5 &= \sum_{j=1}^3 \lambda_{5j} P_{5j}; P_6 = \sum_{j=1}^2 \lambda_{6j} P_{6j}; \end{aligned} \quad (2)$$

где  $P_i$  ( $i=1\div 6$ ) - эффективность выполнения  $i$ -ого фактора;  $\lambda_i$  - коэффициент важности  $i$ -ой цели;  $P_{ij}$  - эффективность выполнения  $j$ -ого подфактора;  $\lambda_{ij}$  - коэффициент важности  $j$ -ого подфактора.

Коэффициенты важности позволяют определить «удельный вес» или, другими словами, значимость каждого фактора или подфактора в суммарной эффективности процесса обеспечения экологической безопасности. Данные коэффициенты, при оценке эффективности, рассчитываются бинарным способом для каждого фактора.

Найдём коэффициент важности.

Для каждой квадратной матрицы параметров (целей и подцелей) определим сумму цифр, стоящих в каждой  $i$ -ой строке. Другими словами, вычислим значения  $\sum_{j=1}^m C_{ij}$ , где  $j$  - столбец.

Затем рассчитаем значение  $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij}$ , для чего сложим все цифры в столбце сумм строк.

Определим коэффициент важности по каждой цели (подцели) как отношение суммы цифр в каждой строке к сумме цифр столбца сумм строк, т.е.

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^m C_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij}}.$$

Например, применительно к матрице параметров:

|    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
|    | Ц1 | Ц2 | Ц3 | Ц4 | Ц5 |
| Ц1 | 1  | 2  | 0  | 1  | 2  |
| Ц2 | 0  | 1  | 2  | 0  | 1  |
| Ц3 | 2  | 0  | 1  | 0  | 2  |
| Ц4 | 1  | 2  | 2  | 1  | 2  |
| Ц5 | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  |

для каждой из пяти строк ( $i = 1 \dots 5$ ) имеем:

$$(i=1): \sum_{j=1}^5 C_{1j} = 6; (i=2): \sum_{j=1}^5 C_{2j} = 4; (i=3): \sum_{j=1}^5 C_{3j} = 5; (i=4):$$

$$\sum_{j=1}^5 C_{4j} = 8; (i=5): \sum_{j=1}^5 C_{5j} = 2.$$

$$\text{Тогда, } \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 C_{ij} = 25.$$

Окончательно получаем следующие значения коэффициентов важности целей:

$$\lambda_1 = \frac{6}{25} = 0,24; \quad \lambda_2 = \frac{4}{25} = 0,16; \quad \lambda_3 = \frac{5}{25} = 0,2;$$

$$\lambda_4 = \frac{8}{25} = 0,32; \quad \lambda_5 = \frac{2}{25} = 0,08.$$

Таким образом, наиболее значимой является цель Ц4, затем, в порядке убывания значимости, следуют цели: Ц1, Ц3, Ц2 и Ц5. Общая эффективность процесса будет определяться выражением:

$$P_{uc} = \sum_{i=1}^m \lambda_i * P_i,$$

где  $m=5$  - количество целей,  $P_i$  - эффективность выполнения  $i$ -ой цели.

Следовательно, чем эффективнее реализованы наиболее значимые цели (в данном примере Ц4 и Ц1), тем выше будет общая эффективность процесса, даже при невысоком проценте выполнения остальных целей, и, наоборот.

Учитывая разнородность факторов и, соответственно, критериев их оценки, необходимо выбрать в качестве показателя эффективности такой, который удовлетворял бы всем видам факторов и подфакторов.

Наибольший интерес представляет критерий максимума аддитивной технической полезности [5], построение которого осуществляется на основании выбранных функций технической полезности, обеспечивающих количественное измерение рассматриваемых факторов ( $\Phi_i$ ) и подфакторов (ПФ <sub>$i$</sub> ).

Функция технической полезности  $P(\Phi)$  - вещественная функция, сохраняющая упорядочение при любых  $\Phi$  тогда и только тогда, когда  $\Phi^1 > \Phi^2 \Leftrightarrow P(\Phi^1) > P(\Phi^2)$ .

Поскольку необходимо увеличивать техническую полезность, подобную оценку можно рассматривать как  $n$  – мерный критерий оптимизации.

Нормированный аддитивный критерий существует в том случае, если функции  $P_i(\Phi)$  подобраны так, что  $P \in [0,1]$  для всех  $\Phi$ , а

коэффициенты  $\lambda_i$  удовлетворяют условию  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, 0; \lambda_i > 0$  для всех  $i = 1, n$ .

По теореме Фишберна [5] представленная функция технической полезности существует тогда и только тогда, когда выполняется условие аддитивной независимости факторов  $\Phi_1 \dots \Phi_6$ .

Аддитивная форма технической полезности не только проста по структуре и удобна для проведения расчетов, но и допускает однозначную физическую интерпретацию, при которой отчетливо прослеживается вклад каждого фактора в общую оценку предпочтительности.

В этом случае критерий эффективности будет иметь вид  $arg \max P_{\Sigma}(\Phi_i); i \in 1, n$ , удовлетворяющий условиям существования ( $обитаемость^1 > обитаемости^2 \Leftrightarrow P^1(\Phi_i) > P^2(\Phi_i)$ ) и непрерывности – дифференцируемости по рассматриваемым процедурам.

Использование в качестве критерия эффективности максимума технической полезности позволяет осуществить нормирование разнородных факторов и подфакторов и формализовать процесс оценки эффективности.

#### Функции технической полезности для различных факторов экологической безопасности

**Воздух рабочей зоны ( $\Phi_1$ ).** В обычном воздухе содержится около 20% кислорода, 78% азота, 0,03% углекислого газа. Уменьшение дозы кислорода до 14% вызывает кислородное голодание, а при 6–9% возникает опасность для жизни. Увеличение содержания углекислого газа в воздухе до 3% вызывает раздражение дыхательных путей, головную боль, головокружение, вялость. Поэтому содержание этого газа не должно превышать в рабочих помещениях 0,1% – в обычных условиях и 0,5% – в условиях кратковременной пребывания [1]. В этом случае для оценки подфактора газового состава ( $\Phi_{11}$ ), как и всех последующих характеристик (подфакторов) может быть применена функция Харрингтона с отрицательным градиентом [5-7]:

$$P(x) = \exp(-\exp(-k(x_{max} - x))), \quad (3)$$

где  $k = \frac{6}{x_{max} - x_{min}}$ ;  $x_{min}$  – минимальное

числовое значение, характеризующее подфактор;  $x_{max}, x_{min}$  – границы процентного содержания кислорода, соответственно 20% и 14% и углекислого газа – 0,03% и 0,1%.

Техническая полезность газового состава будет определяться среднеарифметическим значением технической полезности кислорода и углекислого газа, вычисленным по формуле (3).

Для подфакторов концентрации вредных газов ( $\Phi_{12}$ ), паров ( $\Phi_{13}$ ) и пыли ( $\Phi_{14}$ ) может быть использована техническая функцией полезности релейного вида:

- неудовлетворительно (концентрация вредных газов превышает предельно допустимую) –  $\Phi_{1j}=0$ ;
- удовлетворительно (концентрация вредных газов ниже предельно допустимой) –  $\Phi_{1j}=1$ .

Для подфактора температуры ( $\Phi_{13}$ ), выходящей за пределы оптимальных значений, также может быть применена техническая функция полезности релейного вида:

- неудовлетворительно (температура выше или ниже предельно допустимого диапазона температуры в помещении) –  $\Phi_{15}=0$ ;
- удовлетворительно (температура в помещении находится в допустимом диапазоне) –  $\Phi_{15}=1$ .

Для учёта скорости движения воздуха ( $\Phi_{14}$ ) используется релейная функция полезности:

- неудовлетворительно (скорость движения воздуха в помещении выше предельно допустимого значения) –  $\Phi_{16}=0$ ;
- удовлетворительно (скорость движения воздуха в помещении ниже предельно допустимого значения) –  $\Phi_{16}=1$ .

**Освещение ( $\Phi_2$ ).** Для подфактора  $\Phi_{21}$  (система освещения) используется табличная функция полезности вида:

- высокоэффективное исполнение –  $\Phi_{21}=1$  (тень отсутствует, рассеянный свет);
- эффективное исполнение –  $\Phi_{21}=0,8$  (слабая тень, нередкий переход от тени к свету);
- среднеэффективное исполнение –  $\Phi_{21}=0,63$  (резкая тень, большая контрастность);
- малоэффективное исполнение –  $\Phi_{21}=0,37$  (тень слабая или средняя, возможно ослепляющее действие).

Для подфактора  $\Phi_{22}$  (источник света) может быть использована функция полезности табличного вида: высокоэффективное исполнение –  $\Phi_{22}=1$  (комбинация прямого и отражённого падения света), эффективное исполнение –  $\Phi_{22}=0,8$  (отражённое падение света), среднеэффективное исполнение –  $\Phi_{22}=0,63$  (прямое падение света).

Для подфактора  $\Phi_{23}$  (расположения источника света) применяется релейная функция полезности вида: эффективно  $\Phi_{23}=1$  (источник света должен располагаться под углом не менее чем 35-40°); не эффективно  $\Phi_{23}=0$  (источник света располагается под углом менее чем 35-40°).

Для оценки подфактора  $\Phi_{24}$  (использование цвета для сигнализации и возможность безошибочного восприятия сигналов на пульте управления) также может быть использована релейная функция полезности вида:

- эффективно –  $\Phi_{24}=1$  (использованы цвета для сигнализации и обеспечена возможность безошибочного восприятия сигналов на пульте управления);
- не эффективно –  $\Phi_{24}=0$  (не использованы цвета для сигнализации и не обеспечена возможность безошибочного восприятия сигналов на пульте управления).

**Шум ( $\Phi_3$ ).** Для оценки уровня звукового давления – подфактора  $\Phi_{31}$  – применяется функция Харрингтона (формула 3), в которой аргументы имеют следующий смысл:  $x_{min}$  – минимальное числовое значение, характеризующее уровень звукового давления;  $x_{max}$  – граница звукового давления на рабочем месте, определяемая санитарными нормами.

Частоту звука –  $\Phi_{32}$  – также можно оценить функцией Харрингтона для следующих аргументов:

$x_{\min}$  - минимальное значение, характеризующее частоту звука в 16 гц;  $x_{\max}$  - граница частоты звука в 20000гц.

Для характеристик *вибрации* ( $\Phi_4$ ): частоты (ПФ<sub>41</sub>), виброскорости (ПФ<sub>42</sub>), виброускорения (ПФ<sub>43</sub>) используем формулу 3, в которой:  $x_{\min} = 0$ ;  $x_{\max}$  - по уровню частоты (35 гц), по виброскорости ( $2,0 \cdot 10^{-2}$  м/с – 112 дБ), по виброускорению ( $2 \text{ м/с}^2$  – 126 дБ).

*Электромагнитные поля* ( $\Phi_5$ ). Для характеристики уровня электростатического поля -  $\Phi_{51}$  в формулу 3 подставим  $x_{\min} = 0$ ;  $x_{\max}$  - граница уровня напряжённости электростатического поля в 60кВ/м или расчётное значение, определяемое в зависимости от времени пребывания оператора в зоне воздействия электростатического поля

$$E_{oon} = \frac{60}{\sqrt{t}}; t - \text{время пребывания оператора в зоне влияния.}$$

Оценим напряжённость (индукцию) постоянного магнитного поля -  $\Phi_{52}$  по формуле 3, при этом  $x_{\min} = 0$ ;  $x_{\max}$  - граница уровня напряжённости (индукции) постоянного магнитного поля 8кА/м или 10мТл.

Для оценки воздействия электромагнитного поля с частотой 50 гц -  $\Phi_{53}$ :  $x_{\min} = 0$ ;  $x_{\max}$  - граница уровня напряжённости электромагнитного поля, (5кВ/м).

*Качка судна* ( $\Phi_6$ ). Оценим вертикальное ускорение (ПФ<sub>61</sub>) по формуле Харрингтона:  $x_{\min} = 0$ ;  $x_{\max}$  - граница вертикального ускорения ( $1 \text{ м/с}^2$ ).

Учтём боковые перегрузки - ПФ<sub>62</sub> - по формуле 3, в которой:  $x_{\min} = 0$ ;  $x_{\max}$  - граничное значение бокового ускорения, составляющее  $0,14 \text{ м/с}^2$ .

Используя предложенный алгоритм оценки эффективности мероприятий по обеспечению экологической безопасности экипажа судна можно сформировать объективную картину и в максимальной степени упростить процесс принятия решений по улучшению экологической обстановки.

### Заключение

Для оценки состояния экологической обстановки на судне используется аддитивный критерий, включающий основные факторы среды обитания экипажа судна: воздух рабочей зоны, освещение, шум, вибрация, показатели электромагнитные поля, качка.

Для оценки вклада каждого фактора в формирование среды обитания экипажа используется бинарный способ как наиболее объективный в рамках экспертной оценки.

Предлагаемый в статье критерий оценки экологической обстановки – критерий максимума аддитивной технической полезности - позволяет объединить разнородные оценочные характеристики факторов и, соответственно, критериев их оценки как количественного, так и качественного характера.

Форма критерия не только проста по своей структуре и удобна при проведении расчетных оценок, но и допускает однозначную физическую интерпретацию, при которой очевиден вклад каждого фактора в общую оценку предпочтительности.

Исследованы различные виды функций технической полезности и определены их конкретные выражения для различных характеристик экологической безопасности. Использованы различные выражения функций полезности: функция Харрингтона с отрицательным градиентом, функция Харрингтона в табличном виде и представление технической функции полезности в релейной форме, которые позволяют сформировать оценочный критерий в относительных единицах.

### Литература

1. 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.
2. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Аксёнов В.А. Оценка экологической эффективности судоходной компании // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (52). С. 86-91.
3. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Показатели экологической безопасности водного транспорта // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1 (53). С. 161-170.
4. 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.
5. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях предпочтения и замещения. - М.: Радио и связь, 1981. - 560 с.
6. Скороходов Д.А. Функции и режимы интегрированных систем управления кораблём: учеб. пособие. -СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. - 84 с.
7. 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.

### References

1. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Marinov M.L. Sistematizaciya 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.
2. 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.

3. 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.
4. Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N., Kaminsky V.Yu. Modelirovanie deystvij 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.
5. 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.
6. Skorohodov D.A. Funkcii i rezhimy integrirovannykh sistem upravleniya korablyom: ucheb. posobie [Functions and modes of integrated ship control systems: studies. stipend]. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2010. - 84 p.
7. Kozhevnikov D.F., Polyakov A.S., Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Ehkologicheskaya bezopasnost pri avariayah na morskoy sostavlyayushchej multimodalnoj truboprovodnoj sistemy [Environmental safety in case of accidents on the marine component of a multimodal pipeline system] // Morskie intellektualnye tekhnologii. 2020. №1-2 (48). pp. 180 – 188.

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

**Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Dmitriy A. Skorokhodov**, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

**Валерий Юрьевич Каминский**, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**Valery Yu. Kaminsky**, senior lecturer, PhD. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**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

**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

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 21.02.2022.

Научная статья

УДК 621.391.26, 004.627, 932.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.017>

## Исследование эффективности морской интеллектуальной видеосистемы обработки подводных изображений

Ш.С. Фахми<sup>1,2</sup> shakeebf@mail.ru, Н.В. Шаталова<sup>1</sup> shatillen@mail.ru,  
Е.В. Костикова<sup>3</sup> kostikova.ev@mail.ru, О.В. Бородин<sup>1</sup> 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.** Исследование оптических изображений морских сюжетов с учетом статистических свойств сигнала для мониторинга морских глубин и затянувшихся объектов в настоящее время является актуальной темой, которой может быть использована для создания систем охраны окружающей среды через подводную экосистему. Среди различных областей исследований кодирование изображений широко применяются для сжатия и обеспечения надежной доставки видеoinформации по каналам связи. Одной из проблем, с которыми приходится сталкиваться при подводной связи, является низкая скорость передачи данных в акустических каналах, особенно при съемке изображений в глубоких водах, где нехватки света представляет собой серьезную проблему для качественного восстановления сжатых изображений. Двумерное дискретное косинусное преобразование является основным механизмом, который используется для сжатия изображений. В работе приводятся результаты тестирования алгоритмов сжатия с применением двух разных модификации путём изменения размера сегментов, подвергающихся спектральной обработке для обеспечения оперативной доставки и необходимой битовой скорости передачи с учетом пропускной способности канала связи.

**Ключевые слова:** морская среда, подводные изображения, сжатие, восстановление, структурное сходство, дискретное косинусное преобразование.

**Для цитирования:** Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородин О.В. Исследование эффективности морской интеллектуальной видеосистемы обработки подводных изображений, Морские интеллектуальные технологии 2022. Т. 1, Номер 1. С. 133—140

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.017>

## Investigation of the effectiveness of the marine intelligent video system for processing underwater images

Shakeeb S. Fahmi<sup>1,2</sup> shakeebf@mail.ru, Natalia V. Shatalova<sup>1</sup> shatillen@mail.ru,  
Elena V. Kostikova<sup>3</sup> kostikova.ev@mail.ru, Olga V. Borodina<sup>1</sup> 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.** The study of optical images of marine scenes, taking into account the statistical properties of the signal for monitoring the depths of the sea and lingering objects, is currently an urgent topic that can be used to create environmental protection systems through the underwater ecosystem. Among various fields of research, image encoding is widely used to compress and ensure reliable delivery of video information through communication channels. One of the problems that one has to face with underwater communication is the low data transfer rate in acoustic channels, especially when shooting images in deep waters, where the lack of light is a serious problem for high-quality restoration of compressed images. Two-dimensional discrete cosine transform is the main mechanism that is used for image compression. The paper presents the results of testing compression algorithms using two different modifications by changing the size of segments undergoing spectral processing to ensure prompt delivery and the required bit rate, taking into account the bandwidth of the communication channel.

**Keywords:** Marine environment, underwater images, compression, restoration, structural similarity, discrete cosine transformation.

**For citation:** Shakeeb S. Fahmi, Natalia V. Shatalova, Elena V. Kostikova, Olga V. Borodina Investigation of the effectiveness of the marine intelligent video system for processing underwater images, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 133—140

### Введение

Подводная оптическая визуализация является сложной частью исследований в области компьютерного зрения [1]. В отличие от наземной фотографии, в подводной съемке существует множество ограничений [2], [3]. Во-первых, из-за

среды рассеивание всегда вызывает эффект размывания при подводной съемке. Это редко происходит при наземной фотографии. Во-вторых, поглощение длины волны обычно вызывает уменьшение цвета на захваченных изображениях, что редко происходит в воздухе. В-третьих, кроме электронного шума, отложения в воде также влияют

на изображение в больших размерах. Другая проблема возникает из-за того, что для подводной съемки широко используется искусственное освещение, и это неравномерное освещение вызывает виньетирование на изображениях [2], вызванное диафрагмами оптической системы. Кроме того, мерцающие эффекты всегда существуют в солнечный день. Это приводит к появлению запечатленных изображений с сильными бликами на мелководье. Следовательно, подводные изображения обладают специфическими характеристиками, которые необходимо учитывать при сборе и обработке.

Хотя последние достижения в области оптических технологий визуализации позволили исследователям, работающим в этой области, решить научные проблемы и выполнить проекты, о которых можно было только мечтать в прошлые годы, имеет смысл проявить скромность и осознать, то что вероятно самые сложные системы визуализации в море - это системы животных, которые зависят от своих зрительных рецепторов, и позволяющих находить добычу, спариваться и избегать вреда. Тем не менее, в последнее десятилетие значительно расширились наши возможности по обработке изображений подводных объектов. Это связано с нынешней революцией в электронике и сенсорных технологиях в сочетании с достижениями в области обработки сигналов и изображений.

В настоящее время обработка видеoinформации, полученной из различных камер мониторинга морского дна является важнейшей задачей и одним из лучших инструментов для извлечения необходимой информации о подводных объектах в естественной среде, такой как взаимодействие с окружающей средой и анализ поведения объектов, лежащих на морском дне. Высококачественная оптическая визуализация в подводной среде для мониторинга морских объектов может быть использована для систем охраны окружающей среды через подводную экосистему.

Приём видеoinформации подводной среды [3] и выполнение предварительной и последующей обработки с целью интеллектуального анализа видеоданных и извлечения знаний являются ключевым подходом в решении множества научных проблем классификации и распознавания подводных объектов. Однако особое место среди различных областей исследований подводного мира методы кодирования изображений представляют собой важнейший инструмент доставки и широко применяются с целью уменьшения битовой скорости для надежной передачи по каналам с учетом пропускной способности. Одной из наиболее важных проблем во время подводной связи является низкая битовая скорость передачи данных в акустических каналах, особенно при съемке изображений в глубоких водах (в этом случае свет, необходимый для съемки, обеспечивается батареей).

Процесс обработки после создания датчиком изображения включает следующие основные процедуры: оцифровка, уменьшение шума, выравнивание гистограммы и квантование. Этот процесс необходим для того, чтобы предоставить возможность обработки и хранения. Предварительная обработка всегда представляет

собой подготовку полученной видеoinформации к дальнейшей обработке и включает некоторые исправления и улучшения изображения. Как правило, такая подготовка способствует восстановлению и улучшению качества неудовлетворительных и плохих изображений. Обычно ограничения подводной сцены обусловлены результатом мультипликативных и аддитивных методов [4]. Поэтому различные технологии усиления, такие как усиление яркости, гамма-коррекция, выравнивание гистограммы, имеют ограничения для такой задачи. Часто на практике эти проблемы решаются с помощью стратегий использования нескольких изображений [5], специализированного оборудования или поляризационных фильтров [6], [7]. Несмотря на их исследование, они все еще страдают от ряда проблем, которые снижают их практическую применимость.

Для получения подробной информации о подводной оптической визуализации для обработки снимков необходимо отслеживать поведение солнечного света в подводной среде. Его длина волны включает диапазон {400–700нм} [4], [5], [8]. Поскольку свет является электромагнитной волной, он имеет ограниченный диапазон распространения в воде. Диапазон распространения зависит от частоты компонентов света (от красного до синего в спектре белого света), так что длина волны синего цвета имеет наибольший диапазон, а красного – наименьший (рис. 1).

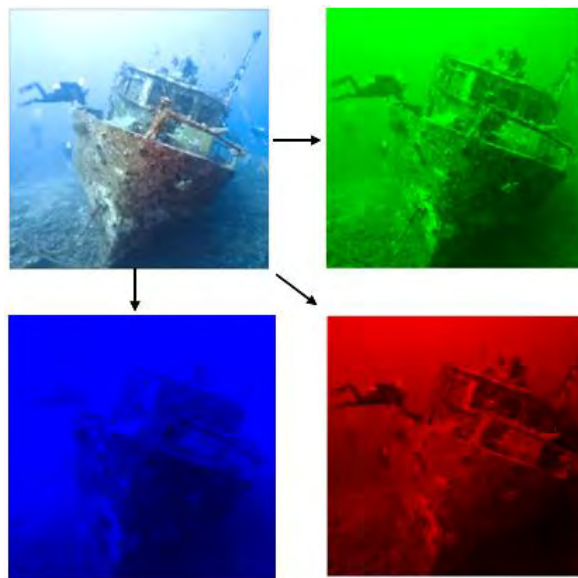


Рис. 1. Разложение изображения на компоненты цвета (красный, синий и зеленый)

Такие ограничения являются факторами, которые приводят к получению изображений низкого качества, требующих обработки (т.е. изображений, полученных подводными оптическими датчиками), поскольку их качество в значительной степени зависит от степени сжатия изображения [7].

В данной статье рассматриваются алгоритмы оценки параметров и качества восстановленных сжатых подводных оптических изображений, закодированных с помощью двумерного дискретного косинусного преобразования (ДКП-2D), при использовании различных размеров равномерной

сетки (8×8, 16×16 и 32×32), формирующей необходимый набор сегментов. Сегменты равномерной сетки далее подвергаются ДКП-2D.

Приводятся результаты исследований по выравниванию гистограммы на основе адаптивного перекрытия блоков однородных областей исходного изображения. А также выполнена оценка информационных показателей качества системы передачи видеoinформации затянувшихся объектов при учете пропускной способности канала связи.

### 1. Выравнивание гистограммы изображений

Основная цель предлагаемой системы повышения контрастности состоит в двух аспектах: локально адаптивное выравнивание гистограммы и уменьшение нежелательных артефактов, таких как шум и блокирующий артефакт. В частности, локальная адаптивность обеспечивается обработкой на основе блоков, артефакт блокировки уменьшается за счет перекрытия соседних блоков, а шум подавляется пространственно-временной адаптивной фильтрацией. Алгоритм выравнивания гистограммы с перекрытием блоков:

Шаг 1: Приём входного изображения в виде матрицы  $M \times N$  и инициализация входных параметров обработки начиная с первой строки:

$$x \leftarrow \text{input image}; m \leftarrow 0,$$

где  $m$  - вертикальное положение обрабатываемого блока.

Шаг 2: Если  $m = M$ , то конец алгоритма, в противном случае переход к следующему шагу.

Шаг 3: Увеличение  $m$  на единицу и начать обработку с первого столбца:

$$m \leftarrow m + 1; n \leftarrow 0,$$

где  $n$  представляет горизонтальное положение обрабатываемого блока.

шаг 4: Увеличьте  $n$  на единицу и фиксация центрального пикселя  $(m, n)$ -го блока с результатом выравнивания гистограммы:

$$n \leftarrow n + 1; x \left( m + \frac{B}{2}, n + \frac{B}{2} \right) \leftarrow T_{m,n} \left[ x \left( m + \frac{B}{2}, n + \frac{B}{2} \right) \right]$$

где  $B$  представляет собой размер блока, для которого выполняется выравнивание гистограммы, и  $T_{m,n}$  - преобразование интенсивности пикселей, т.е. характеристика функции ввода-вывода, с помощью которой осуществляется выравнивание гистограммы в  $(m, n)$ -м блоке. Процесс выравнивания гистограммы подробно описан в [8].

Шаг 5: Если  $n = N$ , переход к шагу 2, в противном случае переход к шагу 4.

Результаты выравнивания гистограммы при обработке морских затянувшихся объектов показаны на рис. 2.

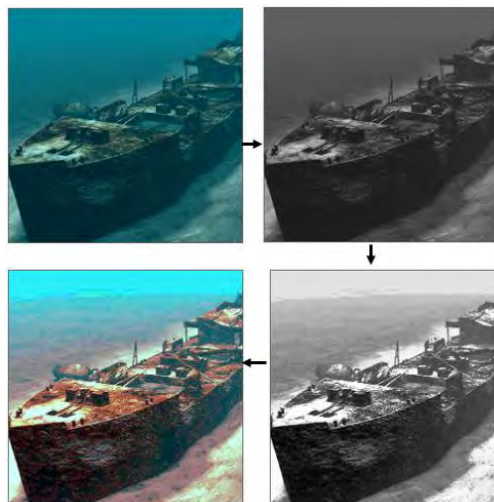


Рис. 2. Выравнивание гистограммы изображения затянувшихся морского судна

Взаимосвязь между всем изображением и  $(m, n)$ -м блоком показана на рис. 3, где выравнивание гистограммы выполняется на соответствующем блоке  $B \times B$ , и интенсивность центрального пикселя в блоке преобразуется в соответствии с выравниванием.

Чтобы вычислить гистограмму следующего блока, то есть  $(m, n + 1)$ -го блока, нужно добавить последний столбец нового блока и отбросить первый столбец старого блока.

Далее после формирования изображения с выравненной гистограммой необходимо выполнить кодирование полученного изображения с использованием ДКП для дальнейшей передачи по каналу связи

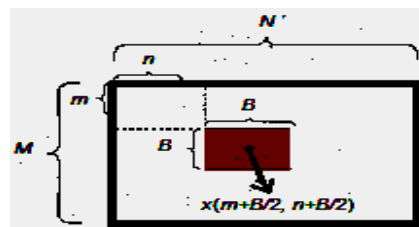


Рис. 3. Взаимосвязь между всем изображением и  $(m, n)$ -м блоком

### 2. Процесс сжатия видеoinформации

ДКП используется для преобразования пространственных фактов в частотную статистику. Это позволяет кодировщику отбрасывать информацию, соответствующую лучшим частотам видео, которые могут быть гораздо менее заметны для человеческого глаза.

**Квантование:** квантование выполняется над коэффициентами ДКП либо аутентичных кадров, либо ДКП остатка, чтобы ограничить набор жизнеспособных значений, передаваемых путем их объединения в группы значений, которые могут быть почти идентичными.



**Энтропийное кодирование:** энтропийное кодирование - это самостоятельный блок, предназначенный для выполнения кодирования битовой информации без потерь с целью формирования транспортного потока битов и с возможностью корректировки ошибок передачи. Учитывая, что энтропийное кодирование является способом сжатия без потерь, то коэффициент сжатия является критическим ограничением. Часто на практике, этот вид кодирования осуществляется с применением одного из следующих методов: кодирование длин серий, кодирование методом Хаффмана или арифметическое кодирование [8], [9].

**2D-ДКП, базисные функции и матрица ДКП.** ДКП является одним из наиболее важных преобразований в частотной области, использующих ортонормированные косинусные базисные функции. Одним из наиболее важных свойств этого преобразования является его реализация с минимальным количеством операций по сравнению с дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) и его реализованной версией под названием быстрое преобразование Фурье (БПФ).

В случае цифрового изображения в другом пространстве, т. е. в области комплексных значений, необходимо разделить данные на реальную и мнимую части, включая соответствующую фазу. Поэтому ДКП больше подходит для полутоновых реальных изображений. Еще одним свойством ДКП является более низкая вычислительная сложность, что делает его оптимальным инструментом для сжатия изображений в реальном времени.

Главным преимуществом ДКП является его свойство уплотнения энергии, то есть вся энергия сигнала до применения ДКП концентрируется всего в нескольких коэффициентах ДКП после преобразования. Следовательно, большинство других коэффициентов становятся нулевыми или пренебрежимо малыми и могут быть проигнорированы или усечены.

В основе работы ДКП лежит использование простого разбиения исходного изображения на сегменты размером 8×8 и выполнение ДКП, которое обеспечивается двумя устройствами – кодером и декодером.

ДКП оперирует с блоками **X** размером  $N \times N$  элементами и порождает блок коэффициентов **Y** (рис. 1.4):

$$Y = A \cdot X \cdot A^T,$$

а обратное преобразование (ОДКП):

$$X = A^T \cdot Y \cdot A,$$

где **X** – исходная матрица, **Y** – матрица коэффициентов и **A** – матрица преобразования:

$$A = C_i \cos \frac{(2j+1)i \cdot \pi}{2N}, \text{ где } C_j = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, & \text{при } (i = 0), \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & \text{при } (i > 0) \end{cases}.$$

Рассмотрим более подробно процесс сжатия на основе двумерного ДКП-2D.

Описание ДКП-2D заключается в следующем. Изображение делится на сегменты размером  $M \times N$ ,

для формирования равномерной сетки ДКП, где  $M \times N$  – это размеры матрицы пикселей изображения.

ДКП-2D представляется как:

а) для прямого ДКП-2D:

$$F(v, w) = (v, N)(w, M) = \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) \cdot \frac{\cos(2x+1)v\pi}{2L} \cdot \frac{\cos(2y+1)w\pi}{2M},$$

где **F** - значение коэффициента прямого косинусного преобразования, **x, y** - координаты пикселя в трёхмерном пространстве куба размером  $M \times N$ , **v, w** – координаты коэффициента преобразования,

$$\alpha(i, j) = \begin{cases} \sqrt{1/j}, & \text{при } i = 0 \\ \sqrt{2/j}, & \text{при } i \neq 0 \end{cases},$$

при этом **j** принимает значение **M** или **N**.

б) для обратного ДКП-2D определяется по формуле:

$$f(x, y) = \sum_{v=0}^{L-1} \sum_{w=0}^{M-1} \alpha(v, N) \alpha(w, M) F(v, w) \cos\left(\frac{(2t+1)v\pi}{2L}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)w\pi}{2N}\right)$$

где **f(x, y)** - значение яркости пикселя с координатами **(x, y)** в пределах блока после обратного ДКП.

Процесс выполнения ДКП видеoinформации в подводной мутной среде заключается в следующем:

- 1) прием входного изображения  $N \times M$ ;
- 2) формирование равномерных сеток (8×8, 16×16 и 32×32) для последующего ДКП;
- 3) для большинства изображений большая часть энергии сигнала приходится на низкие частоты; они отображаются в верхнем левом углу ДКП;
- 4) сжатие достигается за счет того, что нижние правые значения представляют более высокие частоты и часто малы - достаточно малы, чтобы ими можно было пренебречь с небольшим видимым искажением;
- 5) вход ДКП представляет собой массив целых чисел размером 8×8, 16×16 и 32×32. Эти матрицы содержат значения яркостей серого уровня каждого пикселя, т.е. 8-битные пиксели имеют уровни от 0 до 255;

6) выполнение ДКП изображений для получения матриц коэффициентов ДКП для всех размеров сеток, в результате выходной массив коэффициентов ДКП содержит целые числа, которые варьируются от - 1024 до 1023;

Важно отметить, что с вычислительной точки зрения проще реализовать и эффективнее рассматривать ДКП как набор базовых функций, которые при известном размере входной матрицы могут быть предварительно скомпилированы и сохранены.

**Квантование.** Квантование уменьшает объем информации значений коэффициентов ДКП с учётом частоты, используя матрицу квантования по умолчанию [8], [10]. Она содержит регулярные значения (рис. 4). Каждый аспект в матрице коэффициентов DCT делится на соответствующую ему регулярную стоимость в матрице квантования по умолчанию, и вычисляется квантованная матрица коэффициентов DCT. Функция квантования может быть представлена в виде:



где  $u_x$  - среднее  $x$ ,  $u_y$  - среднее  $y$ ,  $\sigma_x$  - дисперсия по  $x$ ,  $\sigma_y$  - дисперсия по  $y$ ,  $\sigma_{xy}$  - ковариация  $x$  и  $y$ .

Данная величина вычисляется между исходным изображением и изображением, полученным посредством обнуления определенного количества коэффициентов в блоке.

Формула сигнал/шум:

$$\text{СИГ/ШУМ} = 20 \log \left( \frac{255}{\sqrt{\frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (f_{ij} - f'_{ij})^2}} \right)$$

Формула вычисления среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (f_{ij} - f'_{ij})^2}$$

Для моделирования используются три размера  $8 \times 8$ ,  $16 \times 16$  и  $32 \times 32$  для формирования равномерной сетки сегментов, затем каждый сегмент подвергается ДКП для достижения оптимального значения коэффициента сжатия при различных размерах сегмента. При этом важно, что для объективного сравнения алгоритмов сжатия необходимо иметь одну и ту же фиксированную ошибку восстановления ( $\sigma^{1/2} = 24$ ) и различных коэффициентов сжатия = 40 (рис. 5).

В таблице 1 представлено время выполнения всех экспериментов и показана лучшая производительность при больших размерах сегментов, а также меньшая вычислительная сложность.

Таблица 1

Оценка времени выполнения алгоритмов кодирования подводных снимков

| Класс изображений | Размер сегмента ДКП | Eff (кад./сек.) | t (сек.) |
|-------------------|---------------------|-----------------|----------|
| Изображение № 1   | 8×8                 | 35              | 6,3      |
|                   | 16×16               | 37              | 4,1      |
|                   | 32×32               | 42              | 2,3      |
| Изображение № 2   | 8×8                 | 33              | 5,8      |
|                   | 16×16               | 39              | 2,5      |
|                   | 32×32               | 44              | 1,2      |
| Изображение № 2   | 8×8                 | 34              | 7,2      |
|                   | 16×16               | 39              | 3,5      |
|                   | 32×32               | 48              | 2,1      |

В таблице 2 приведены СС, СИГ/ШУМ и СКО, подтверждающие предпочтение наилучшего размера сегмента. На рисунке 5 показаны визуальные результаты для реальных иллюстрированных видеоданных затаившихся объектов.

Таблица 2

Оценка показателей качества подводной видеосистемы

| Изображения     | Размер сегмента | Показатели качества системы |         |                |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|---------|----------------|
|                 |                 | СС                          | СИГ/ШУМ | $\sigma^{1/2}$ |
| Изображение № 1 | 8×8             | 0.9569                      | 34.56   | 23             |
|                 | 16×16           | 0.9879                      | 36.53   | 24             |
|                 | 32×32           | 0.8988                      | 38.34   | 20             |
| Изображение № 2 | 8×8             | 0.9779                      | 33.96   | 31             |
|                 | 16×16           | 0.5559                      | 35.59   | 25             |
|                 | 32×32           | 0.8448                      | 39.38   | 23             |
| Изображение № 2 | 8×8             | 0.9769                      | 33.56   | 22             |
|                 | 16×16           | 0.9833                      | 35.32   | 21             |
|                 | 32×32           | 0.8654                      | 41.67   | 26             |

### Заключение

Результаты явно показывают, что больший размер сегмента для выполнения косинусного преобразования не всегда может быть лучше с точки зрения: вычислительной сложности, качества восстановленных изображений и среднеквадратического отклонения. Хотя некоторые эксперименты по сжатию изображений с большей площадью фона по сравнению с площадью объекта, показали, что алгоритмы разбиения исходного изображения на сегменты большого размера ( $16 \times 16$  и  $32 \times 32$ ) являются наиболее эффективными по критерию точности восстановления и сложности устройств кодирования и декодирования изображений. С другой стороны, использование сетки с большим размером не является эффективным подходом для всех классов изображений морских объектов, поскольку некоторые исследования показали, что меньшие размеры сетки могут быть более эффективными для тех изображений, где имеются большое количество деталей, т.е. изображения, которые имеют большое количество объектов интереса по отношению к фону.

### Литература

- Lu H, Li Y, Zhang Y, Chen M, Serikawa S, Kim H. Underwater optical image processing: a comprehensive review. Mob Netw Appl 2017; 22(6): 1204-11. [http://dx.doi.org/10.1007/s11036-017-0863-4].
- Christie S.M., Kvasnik F. Contrast enhancement of underwater images with coherent optical image processors. Appl Opt 1996; 35(5): 817-25. [http://dx.doi.org/10.1364/AO.35.000817] [PMID: 21069075].
- Kocak D.M., Dagleish F.R., Caimi F.M., Schechner Y.Y. A focus on recent developments and trends in underwater imaging. Mar Technol Soc J 2008; 42(1): 52-67. [http://dx.doi.org/10.4031/002533208786861209].
- R. Schettini and S. Corchs, "Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods," EURASIP J. Adv. Signal Process., vol.2010, Dec.2010, Art.no.746052.
- D.-M. Heand, G. G.L. Seet, "Divergent-beam LiDAR imaging in turbid water," Opt. Lasers Eng., vol.41, pp.217–231, Jan.2004.
- C. Ancuti, C.O. Ancuti, T. Haber and P. Bekaert. Enhancing Underwater Images and Videos by Fusion. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pages 81–88, 2012.
- Иванов А.В., Фахми Ш.С. Обработка видеoinформации в транспортных видеосистемах реального времени: Монография. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация ВУЗ, 2021. – 222 с.

8. R.C. Gonzalez and R.E. Woods, Digital Image Processing, Addison-Wesley, 1992.
9. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Колесниченко С.В. Многопроцессорная система обнаружения и слежения за морскими судами на базе технологии "система на кристалле" // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. № 3 (53). С. 179–185.
10. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Крюкова М.С. Выделение контуров морских объектов на основе пирамидально-рекурсивного метода представления изображений // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-2 (44). С. 129–136.
11. 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.
12. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Вислогузов В.В., Костикова Е.В. Многопроцессорная транспортная видеосистема наблюдения на базе технологии "система на кристалле" // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3-1 (49). С. 172–179.
13. Фахми Ш.С. Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов // М.С. Крюкова, Я.А. Хасан, Ш.С. Фахми и др. // Морские интеллектуальные технологии. № 1 (43). Т.3. 2019. С.145–155.

#### References

1. Lu H, Li Y, Zhang Y, Chen M, Serikawa S, Kim H. Underwater optical image processing: a comprehensive review [Underwater optical image processing: a comprehensive review]. Mob Netw Appl 2017; 22(6): 1204-11. [http://dx.doi.org/10.1007/s11036-017-0863-4].
2. Christie S.M., Kvasnik F. Contrast enhancement of underwater images with coherent optical image processors [Contrast enhancement of underwater images with coherent optical image processors]. Appl Opt 1996; 35(5): 817-25. [http://dx.doi.org/10.1364/AO.35.000817] [PMID: 21069075].
3. Kocak D.M., Dalglish F.R., Caimi F.M., Schechner Y.Y. A focus on recent developments and trends in underwater imaging [A focus on recent developments and trends in underwater imaging]. Mar Technol Soc J 2008; 42(1): 52-67. [http://dx.doi.org/10.4031/002533208786861209]
4. R. Schettini and S. Corchs, "Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods" [Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods], EURASIPJ. Adv. Signal Process., vol.2010, Dec.2010, Art.no.746052.
5. D.-M. Heand, G. G.L. Seet, "Divergent-beam LiDAR imaging in turbid water" [Divergent-beam LiDAR imaging in turbid water], Opt. Lasers Eng., vol.41, pp.217– 231, Jan.2004.
6. C. Ancuti, C.O. Ancuti, T. Haber and P. Bekaert. Enhancing Underwater Images and Videos by Fusion [Enhancing Underwater Images and Videos by Fusion]. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pages 81–88, 2012.
7. 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.
8. R.C. Gonzalez and R.E. Woods, Digital Image Processing [Digital Image Processing], Addison-Wesley, 1992.
9. Fakhmi Sh.S., Shatalova N.V., Kostikova E.V., Kolesnichenko S.V. Multi processor systematis technologiae cognoscendi et semitae marinae subnixus "systema-on-chip" technologiae marinae intelligentis [Multiprocessor system for detecting and tracking marine vessels based on the "system on chip" technology]. 2021. Т. 1. N. 3 (53). S. 179-185.
10. Fahmi Sh.S., Shatalova N.V., Kryukova M.S. Vydelenie konturov morskikh ob"ektov na osnove piramidal'no-rekursivnogo metoda predstavleniya izobrazhenij [Highlighting outlines of marine objects based on a pyramidal recursive image representation method]// Morskije i-nellektual'nye tekhnologii. 2019. № 2-2 (44). P. 129–136.
11. Fahmi Sh.S., Kostikova E.V., Shatalova N.V. Transportnye videosistemy na kristalle: metody i tekhnologii proektirovaniya [On-Chip Transport Video Systems: Design Methods and Technologies]: Monograph. – St. Petersburg: Publishing and printing Association VUZ, 2020. S. 346.
12. Fahmi Sh.S., Shatalova N.V., Visloguzov V.V. Kostikova E.V. Mnogoprocessornaya transportnaya videosistema nablyudeniya na baze tekhnologii "sistema na kristalle" [Multiprocessor transport surveillance video system based on "system on chip" technology] // Marine intellectual technologies. 2020. No. 3-1 (49). S. 172–180.
13. Fahmi Sh.S. Metody, algoritmy kodirovaniya i klassifikaciya izobrazhenij morskikh sudov [Methods, algorithms, coding and classification of images ships] // M.S. Kryukov, Y.A. Hassan, S.S. Fahmy et al. // Marine intellectual technologies. No. 1 (43). Vol.3. 2019. p.145 – 155.

#### 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,

**Shakeeb S. Fahmi**, Associate Professor, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shakeebf@mail.ru

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

**Natalia V. Shatalova**, Phd, (Eng)? Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shatillen@mail.ru

**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

**Elena V. Kostikova**, Phd/ (Eng), Associate Professor of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St.Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

**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

**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 01.02.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 21.02.2022.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

### AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 656.07

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.018>

#### Организация мультимодальных перевозок на основе методики оценки валовой прибыли в единицу времени

К.Г. Тюленев<sup>1</sup> kirill.tulenev@gmail.com

<sup>1</sup>Научный центр по комплексным транспортным проблемам

**Аннотация.** Система линейных контейнерных перевозок является одним из важнейших компонентов товаропроводящей сети, обеспечивающей связанность территорий, конкурентоспособность промышленности, развитие внешнеэкономической деятельности. В результате структурных изменений в мировом промышленном производстве линейные контейнерные перевозки получили динамичный импульс развития. В представленной статье рассмотрены специализированные методические подходы к обеспечению эффективности организации линейных контейнерных сервисов с использованием водного и наземного транспорта, определена целесообразность интегрированного управления мультимодальными контейнерными перевозками, сформирован комплекс мер, способствующих привлечению дополнительных грузопотоков, развитию экспорта транспортных услуг и цифровой трансформации в сфере мультимодальных контейнерных перевозок. Внедрение интегрированных инструментов управления линейными контейнерными перевозками позволяет повысить эффективность товародвижения. Линейное контейнерное судоходство ввиду этого становится основой транспортной интеграции при осуществлении международных мультимодальных перевозок. Эффективное использование активов линейного судоходства способствует повышению конкурентоспособности мультимодальных сервисов и российской терминальной инфраструктуры, стимулирует инвестиционный спрос, увеличение объемов производства в регионах, тяготеющих к портам, рост транзитного грузооборота, внося вклад в поступательное развитие внешней торговли и транспортной системы страны.

**Ключевые слова:** контейнеризация, мультимодальность, линейное судоходство, инфраструктура, формализация, стандартизация, экологичность, цифровая трансформация.

**Для цитирования:** Тюленев К. Г., Организация мультимодальных перевозок на основе методики оценки валовой прибыли в единицу времени. Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 141—144

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.018>

#### Management of multimodal transportation based on methodology for estimating gross profit per time period

Kirill G. Tyulenev<sup>1</sup> kirill.tulenev@gmail.com

<sup>1</sup>Research and Analysis Centre for Integrated Transport Solutions, St-Petersburg, Russia

**Abstract.** The system of liner container shipping is one of most important components in the commodity distribution network, enabling the connectivity of territory, competitiveness of industry and development of foreign economic activity. As a result of structural changes in world industrial production, liner container shipping achieved a dynamic development acceleration. Represented article reflects specialized methodological approaches for providing the effectiveness of line container services applying water and land transport, verifies the reasonability of integrated management for multimodal container transportation, forming complex measures supporting the increase of line cargo traffic, developing export of transport services and digital transformation in the sphere of multimodal container transportation. Implementation of integrated procedures for managing liner container transportation is facilitating the efficiency of merchandise flows. On this evidence liner container shipping becomes the basis of transport integration in the international multimodal transportation. Efficient use of liner shipping assets provides the increase of competitiveness for multimodal services and Russian terminal infrastructure, stimulates investment demand, increase of production volumes in regions located towards ports, and the growth of transit cargo turnover, contributing to the progressive development of national transport system and foreign trade.

**Keywords:** containerization, multimodality, line shipping, infrastructure, formalization, standardization, ecological compatibility, digital transformation.

**For citation:** Kirill G. Tyulenev, Management of multimodal transportation based on methodology for estimating gross profit per time period, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 141—144

#### Введение

Сбалансированное развитие мультимодальных перевозок в соответствии с действующими

приоритетами долгосрочной конкурентоспособности национальной транспортной системы целесообразно путем совершенствования механизмов взаимодействия участников транспортного процесса.

Организация согласованного взаимодействия для эффективного распределения грузопотоков, расширения сети транспортных коридоров, оптимизации общих логистических затрат системообразующих цепей поставок создает востребованность применения методов разработки транспортно-технологических схем, способствующих усилению интеграции субъектов рынка контейнерных перевозок [1].

### **Совершенствование методов управления линейными контейнерными перевозками**

Формирование схем мультимодальных контейнерных перевозок, обеспечивающих снижение транспортно-логистических затрат благодаря интеграции видов транспорта, представляется перспективным с применением Методики расчета валовой прибыли в единицу времени (в дальнейшем «Методика»).

При планировании направлений интеграции первостепенным значением обладает скоординированное взаимодействие водного и железнодорожного транспорта. Интегрированное развитие субъектов рынка морских и железнодорожных контейнерных перевозок является стратегически важным базисом повышения конкурентоспособности транспортных коридоров, проходящих по территории Российской Федерации, реализации транзитного потенциала регионов, увеличения экспорта транспортных услуг.

Следуя представленной Методике, выстраивание транспортно-технологических схем полного цикла производится на примере мультимодальной перевозки из портов прямого судозахода с комбинированным использованием сервиса морского транспорта, дальнейшей перевозки контейнеризованного груза железнодорожным транспортом от внутрипортового терминала в сухой порт, региональный терминал или прямой доставки грузополучателям (промышленным предприятиям, владеющим собственными объектами железнодорожной инфраструктуры).

В целях развития скоординированного взаимодействия при выполнении мультимодальной перевозки, приведенная Методика была образована на основе подхода, предусматривающего использование принципов организации линейного сообщения комплексно для морской и наземной транспортировки [2].

В условиях интенсивного увеличения объема контейнеризации грузов [3, 4] линейную контейнерную перевозку целесообразно рассматривать как совокупность морских и наземных участков транспортировки, интегрированных с целью достижения оптимального уровня затрат, транзитного времени, качества транспортного обслуживания.

Скоординированное управление морскими и наземными участками транспортировки осуществляется в рамках мультимодальных линейных контейнерных сервисов (ЛКС) с использованием единого перевозочного тарифа.

Вместе с тем, применение принципов общей тарификации перевозки полного цикла создает потребность совершенствования подходов к структурированию компонентов мультимодальной транспортно-технологической схемы.

Согласно положениям Методики, структура мультимодальной перевозки представляет собой совокупность комплексов транспортных операций — «Cntr depot» и «Multimodal shipment», обладающих эквивалентным содержанием для импортного и экспортного направлений отправок, объединяемых в кругорейсе контейнерного оборудования.

Комплекс «Cntr depot» включает группу транспортных операций основного или транзитного контейнерного терминала - погрузо-разгрузочные работы, операции по сопровождению хранения, ремонту, консолидации контейнерного оборудования.

Комплекс «Multimodal shipment» состоит из пяти групп транспортных операций, соединяющих наземную перевозку от склада грузоотправителя до порта отправления (PRC - Pre-carriage operations), операции внутрипортового терминала порта отправления (THL - Terminal handling charges / operations at POL), морскую перевозку (OFR - Ocean freight operations), операции внутрипортового терминала, обеспечивающие выгрузку контейнера в порту назначения (THD - Terminal handling charges / operations at POD), наземную перевозку до склада грузополучателя (ONC - On-carriage operations).

Детализированное содержание комплексов транспортных операций «Cntr depot» и «Multimodal shipment» представлено в научно-практической работе (монографии) «Управление контейнерными перевозками во внешнеэкономической деятельности» [5].

Для четкого разграничения групп и комплексов, а также отдельных транспортных операций, в рамках Методики произведена формализация транспортно-технологической схемы мультимодальной контейнерной перевозки. Структура унифицированных транспортных операций утверждена введением в действие национального стандарта ГОСТ Р 58977-2020 «Перевозки линейные контейнерные. Транспортно-технологические схемы. Общие положения» [6].

Формализация структуры мультимодальной перевозки создает инструментарий расчета целевых показателей для унифицированных комплексов и групп транспортных операций ЛКС, построения альтернативных вариантов транспортно-технологических схем в сети международных транспортных коридоров, итоговой оценки показателей себестоимости, транзитного времени, качества организации транспортировки, выбора наиболее оптимальной схемы контейнерной перевозки.

Основным экономическим показателем Методики является линейная валовая прибыль в единицу времени (далее - «GPT»). Значение показателя GPT определяет рациональность использования и потенциал оптимизации общей транспортно-технологической схемы с учетом краткосрочных изменений стоимости перевозки на всех участках маршрута, анализа оперативных данных в части загруженности объектов инфраструктуры, наличия железнодорожного подвижного состава и контейнерных слотов линейных судов, достаточного объема порожнего оборудования, резервов пропускной и провозной способности грузовых терминалов.

При оценке экономических показателей мультимодальной перевозки линейная валовая прибыль (GP) является совокупностью значений показателей прибыли отдельных ЛКС, представляя собой разность выручки от реализации транспортных операций (RFO – Line revenue from transport operations) и операционных расходов (OpsC – Operating costs):

$$GP = \sum \text{Line service } A \dots i \text{ GP} \quad (1)$$

$$\text{Line service } A \dots i \text{ GP} = \text{Line service } A \dots i \text{ RFO} - \text{Line service } A \dots i \text{ OpsC} \quad (2)$$

где Line service A...i GP – валовая прибыль ЛКС A...i; Line service A...i RFO – выручка от реализации транспортных операций ЛКС A...i; Line service A...i OpsC – операционные расходы ЛКС A...i.

Согласно приведенной Методике, валовая прибыль частных перевозок ЛКС (Line booking GP) оценивается относительно общего времени выполнения транспортных операций (T), формируя основной показатель линейной валовой прибыли в единицу времени (GPt):

$$\text{Line Booking } A \dots i \text{ GP}_t = (\text{Booking } A \dots i \text{ RFO} - \text{Booking } A \dots i \text{ OpsC}) / T \quad (3)$$

где Line booking A...i GPt – прибыль от транспортировки грузовой партии в единицу времени; Line booking A...i RFO – выручка от реализации транспортных операций перевозки A...i; Line booking A...i OpsC – операционные расходы перевозки A...i; T – временной период перевозки - продолжительность выполнения групп и комплексов транспортных операций.

Дальнейшая интеграция процессов управления мультимодальной контейнерной перевозкой включает регулирование технологических параметров ЛКС на основе экономической оценки показателя GPt.

С учетом высокой волатильности рынка морских контейнерных перевозок [7, 8], обновление расчетных значений GPt для транспортно-технологических схем в рамках приведенной Методики производится ежемесячно или с более частой периодичностью.

По итогам выбора оптимального значения GPt участники транспортного процесса создают или совершенствуют структуру ЛКС в соответствии с интегрированными планами внешнеэкономического сотрудничества.

Координационный центр, объединяющий участников транспортного процесса, контролирует соблюдение значений целевых индикаторов GPt, утвержденных в ходе проектирования морских и наземных участков ЛКС.

Последовательное применение Методики при организации международных перевозок способствует привлечению инвестиций иностранных компаний в виде создания совместных транспортных продуктов, в частности, взаимовыгодного дополнения групп и комплексов операций мультимодальной перевозки.

Представленные практические подходы внедрены в период 2009-2015 г. в рамках сотрудничества международной компании – судоходной

контейнерной линии UASC (United Arab Shipping Company), российских операторов железнодорожного и автомобильного транспорта.

Ввод в эксплуатацию специализированных линейных контейнерных сервисов UASC из портов Санкт-Петербург и Новороссийск (с использованием фидерных линий) в регионы Ближнего Востока увеличил пропускную способность транспортных коридоров для экономически выгодной транспортировки российских экспортных грузов.

Целесообразность организации совместного интегрированного ЛКС с использованием морского и наземного транспорта была обоснована расчетом целевого индикатора - валовой прибыли в единицу времени (GPt).

Результаты внедрения практических решений, касающиеся общего развития линейных контейнерных сервисов, запуска регулярных прямых судозаходов и дополнительной загрузки слотов региональных фидерных линий, в тоже время содействуют росту экспорта транспортных услуг, оказываемых субъектами рынка наземных контейнерных перевозок и другими участниками транспортных процессов.

К актуальным преимуществам Методики также следует отнести возможность пообъектного распределения объема выбросов загрязняющих веществ относительно групп и комплексов транспортных операций, унифицированных в рассмотренной структуре мультимодальной контейнерной перевозки.

Контроль выбросов веществ, загрязняющих атмосферный воздух, в этом случае производится с применением транспортно-технологических схем, регламентирующих порядок выполнения транспортных операций, при соблюдении которого фактические объемы выбросов загрязняющих веществ не превышают уровни, установленные экологическими нормативами качества атмосферного воздуха.

Значимым результатом внедрения Методики является сокращение сроков разработки и процедур согласования мультимодальных транспортно-технологических схем, достигаемое вследствие наличия упорядоченной формализованной структуры транспортных операций контейнерной перевозки.

Формализация схем мультимодальных перевозок грузов в виде разработки документов нормативного технического регулирования на основе базового ГОСТ Р 58977-2020 содействует совершенствованию информационно-аналитического обеспечения цифровой трансформации национального транспортного комплекса.

### Заключение

В связи с интенсивностью внедрения технологий контейнеризации грузов линейную контейнерную перевозку целесообразно рассматривать как совокупность интегрированных процессов управления судоходством и объектами наземной инфраструктуры в рамках мультимодальных транспортно-технологических схем.

Привлечение тоннажа линейного судоходства в интересах создания комбинированных контейнерных сервисов и увеличения инфраструктурных резервов способствует наращиванию производственных



мощностей контейнерных терминалов, операторов наземной доставки грузов, сбалансированности локального спроса и предложения в сфере мультимодальных перевозок.

С учетом изложенного, можно утверждать, что формирование интегрированных методов управления линейными контейнерными сервисами с использованием водного и наземного транспорта, при внедрении Методики расчета валовой прибыли в единицу времени, способствует оптимизации транспортно-технологических схем товародвижения; повышению экономической эффективности функционирования сетей распределения продукции; расширению нормативной технической базы, способствующей оптимизации передачи данных в едином информационном пространстве; внедрению

интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и цифровых транспортно-логистических платформ (ЦТЛП), повышающих конкурентоспособность российских товаров, производителей и поставщиков транспортно-логистических услуг; комплексному развитию линейных контейнерных перевозок, мультимодальных и интермодальных сервисов, соответствующей наземной транспортной инфраструктуры в Российской Федерации.

Системное внедрение методов интегрированного управления линейными контейнерными сервисами будет также создавать благоприятные условия для оптимизации затрат, скорости и качества организации мультимодальных контейнерных перевозок, роста экспорта транспортных услуг.

#### Литература

1. Тюленев К.Г. Инвестиции судоходных линий в развитие транспортной отрасли // Специализированный научно-практический журнал «Логистика». 2015. № 2 (99). С. 32-35.
2. Тюленев К.Г. Принятие решений по системному управлению линейными контейнерными перевозками // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т.3. №3 (37). С. 97-104.
3. «Alphaliner» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.alphaliner.com/top100>.
4. «Marine Traffic» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.marinetraffic.com/ru>.
5. Тюленев К.Г. Управление контейнерными перевозками во внешнеэкономической деятельности. СПб., ИПТ РАН, 2017, 112 с.
6. ГОСТ Р 58977-2020 «Перевозки линейные контейнерные. Транспортно-технологические схемы. Основные положения». М, 2020. 7 с.
7. «China Containerized Freight Index» (CCFI) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://en.sse.net.cn/indices/ccfinew.jsp>.
8. «Freightos Baltic Global Container Index (FBX)» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.balticexchange.com/en/data-services/routes.html>

#### References

1. Tyulenev K.G. Investitsii sudokhodnykh liniy v razvitiye transportnoy otrasli [Investment of shipping companies in the development of the transport industry]. Spetsializirovanny nauchno-prakticheskiy zhurnal «Logistika». 2015. № 2 (99). S. 32-35.
2. Tyulenev K.G. Prinyatiye resheniy po sistemnomu upravleniyu lineynymi konteynernymi perevozkami [Decision making in system management of line container shipments]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2017. T.3. №3 (37). S. 97-104.
3. Alphaliner, <http://www.alphaliner.com/top100>.
4. Marine Traffic, <https://www.marinetraffic.com/ru>.
5. Tyulenev K.G. Upravleniye konteynernymi perevozkami vo vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti [Container transportation management in foreign economic activity]. SPb., IPT RAN, 2017, 112 s.
6. GOST R 58977-2020. Perevozki lineynyye konteynernyye. Transportno-tekhnologicheskiye skhemy. Osnovnyye polozheniya [National standard 58977-2020. Liner container transportation. Transport and technological schemes. Basic principles]. M, 2020, 7 s.
7. China Containerized Freight Index (CCFI), <https://en.sse.net.cn/indices/ccfinew.jsp>.
8. Freightos Baltic Global Container Index (FBX), <https://www.balticexchange.com/en/data-services/routes.html>

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

**Кирилл Геннадьевич Тюленев**, заместитель директора, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научный центр по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации», 107045, Москва, Пушкин пер., 3, e-mail: [kirill.tulenev@gmail.com](mailto:kirill.tulenev@gmail.com)

**Kirill G. Tyulenev**, deputy director, Federal Ministry of Transport's Budgetary Institution «Research and Analysis Centre for Integrated Transport Solutions», Pushkarev pereulok, 3, Moscow, 107045, Russian Federation, e-mail: [kirill.tulenev@gmail.com](mailto:kirill.tulenev@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 21.02.2022.

Научная статья

УДК 004.89:004.832.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.019>

## Оптимальное управление реализацией сложных технологических процессов в условиях производственного предприятия

В.Б. Мелехин<sup>1</sup> pashka1602@rambler.ru, Г.Х. Ирзаев<sup>1</sup> irzajev@mail.ru

<sup>1</sup>Дагестанский государственный технический университет

**Аннотация.** Для решения задачи автоматического выбора управленческих воздействий на множестве заданных альтернатив в условиях нестабильной окружающей среды, возникает необходимость в построении многопараметрических эмпирических моделей сложных технологических процессов с четко заданными коэффициентами. Построена аналитическая зависимость показателей эффективности сложных технологических процессов от параметров управления в виде графика или аналитической связи между зависимой и независимыми переменными лингвистической функции, которая построена по экспертным данным, обработанным методом множественного регрессионного анализа. Графики лингвистических функций позволяют визуализировать зависимость показателей эффективности технологического процесса от параметров управления, установить наиболее чувствительные из них. Предложена методика оценки комплексной эффективности и оптимального управления реализацией сложных технологических процессов. На основе принципа гибкого приоритета определен интегральный критерий оценки эффективности текущего состояния технологических процессов, позволяющий свести решение многокритериальной задачи выбора эффективных управляющих воздействий к однокритериальной оптимизационной задаче при наличии как максимизируемых, так и минимизируемых показателей эффективности.

**Ключевые слова:** сложный технологический процесс, управляющее воздействие, нестабильная среда, показатель эффективности, лингвистическая функция, свертка, нечеткий алгоритм, экспертные данные.

**Для цитирования:** Мелехин В.Б., Ирзаев Г.Х. Оптимальное управление реализацией сложных технологических процессов в условиях производственного предприятия, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 145—150

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.019>

## Optimal management of the implementation of complex technological processes in a manufacturing enterprise

Vladimir B. Melekhin<sup>1</sup> pashka1602@rambler.ru, Gamid Kh. Irzajev<sup>1</sup> irzajev@mail.ru

<sup>1</sup>Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation

**Abstract.** To solve the problem of automatic selection of management influences on a set of given alternatives in an unstable environment, it becomes necessary to build multi-parameter empirical models of complex technological processes with clearly specified coefficients. The analytical dependence of the efficiency indicators of complex technological processes on the control parameters in the form of a graph or an analytical relationship between the dependent and independent variables of the linguistic function, which is built on the basis of expert data processed by the method of multiple regression analysis, has been built. Graphs of linguistic functions make it possible to visualize the dependence of technological process efficiency indicators on control parameters, to establish the most sensitive ones. A methodology for assessing the integrated efficiency and optimal management of the implementation of complex technological processes is proposed. On the basis of the principle of flexible priority, an integral criterion for evaluating the effectiveness of the current state of technological processes has been determined, which makes it possible to reduce the solution of the multicriteria problem of choosing effective control actions to a single-criterion optimization problem in the presence of both maximized and minimized performance indicators.

**Keywords:** complex technological process, control action, unstable environment, efficiency indicator, linguistic function, convolution, fuzzy algorithm, expert data.

**For citation:** Vladimir B. Melekhin, Gamid Kh. Irzajev, Optimal management of the implementation of complex technological processes in a manufacturing enterprise, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 145—150

### Введение

Любое производственное предприятие характеризуется реализацией сложных технологических процессов (СТП) в нечеткой динамической среде. Оптимальное управление такими процессами характеризуется рядом особенностей, среди которых альтернативность и неопределенность путей достижения цели с высоким

риском, невозможность точного планирования, ориентация на прогнозные оценки, противоречивость в отношениях и интересах участников. В этих условиях главным препятствием для создания автоматизированных интегрированных систем управления СТП является сложность описания проектных процедур и принятия оптимальных решений в условиях технологической подготовки производства. Это способствует поиску новых

подходов к формализации методов интегрального показателя эффективности СТП и оптимального управления его реализацией.

Для оптимального управления технологическим процессом в [1] предложен принцип ситуационного управления, предполагающий выбор управляющих воздействий на основании информации о текущей ситуации на объекте управления и практики применения их в прошлом. Предложено использование сетей Петри для моделирования технологических процессов и выявления самого эффективного из них [2, 3]. Однако недостатком традиционного аппарата сетей Петри является невозможность применения построенных на их основе моделей в качестве управляющих из-за асинхронности функционирования самой сети и нереализуемости на них заданного режима работы технологических объектов, что приводит к необходимости модификации сетей [4]. В работе [5] предложена робастно-адаптивное управление объектом с запаздыванием по управлению, которая актуальна для задач автоматизации технологических процессов. Помимо методов управления в работе [6] рассматривается возможность применения визуальных анализаторов, которые обеспечивают интеллектуализацию решений, принимаемых операторами технологических процессов. Однако на сегодняшний день проблемы выбора управляющих воздействий в условиях нестабильной окружающей среды не удалось решить до конца.

Учитывая многовариантность задачи и многокритериальность описания вариантов в системах управления сложными объектами, наиболее приемлемым аппаратом решения этой задачи является обработка экспертных данных с помощью математического аппарата нечетких множеств. Использование его позволяет получить на основе лингвистических переменных качественные и количественные значения показателей текущего состояния СТП и сформировать на этой основе нечеткие алгоритмы управления процессом их регулирования [7, 8]; построить математические модели в виде нечетко или интервально заданной зависимости между отдельными показателями, определяющими состояние технологического процесса с учетом взаимовлияния [9]; сформировать математические модели технологического процесса в виде уравнений с нечетко заданными коэффициентами [10].

Для решения задачи автоматического выбора управленческих воздействий на множестве заданных альтернатив в условиях нестабильной окружающей среды, возникает необходимость в построении многопараметрических эмпирических моделей технологического объекта с четко заданными коэффициентами. Это позволит обеспечить однозначный выбор эффективных управляющих воздействий на альтернативной основе, например, по степени их влияния на эффективность реализации СТП в нестабильных внешних условиях.

Предлагаемые подходы к построению многофакторных эмпирических математических моделей для принятия непрограммируемых управленческих решений и метод выбора на альтернативной основе эффективных управляющих воздействий основываются на обработке экспертной информации и практического опыта управления с

помощью аппарата нечетких множеств, проектирования многофакторной многокритериальной эмпирической математической модели эффективности состояния СТП в виде системы уравнений, состоящей из графиков лингвистических функций [11], имеющих четко заданные коэффициенты при параметрах состояния технологического объекта. Затем осуществляется выбор на альтернативной основе наиболее эффективных управляющих воздействий с предварительной экстраполяцией их влияния на повышение эффективности реализации СТП.

#### Построение аналитической зависимости показателей эффективности технологических процессов от параметров управления

В общем случае влияние различных параметров управления  $P_{j_1} = \{p_{j_1}\}, j_1 = \overline{1, m_1}$  на показатели эффективности  $\mathfrak{E} = \{\mathfrak{e}_{j_2}\}, j_2 = \overline{1, m_2}$  сложного технологического процесса можно определить с помощью соответствующих им функционалов. Отметим, что, как правило, на допустимые значения параметров управления  $p_{j_1, j_2} \in P$ , от значений которых зависят показатели эффективности  $\mathfrak{e}_{j_2} \in \mathfrak{E}$ , соответствующие текущему состоянию СТП, накладываются ограничения следующего вида:

$$p_{j_1, j_2}(\min) \leq p_{j_1, j_2} \leq p_{j_1, j_2}(\max),$$

где  $p_{j_1, j_2}(\min)$  – минимальные значения параметров управления  $p_{j_1, j_2} \in P$ , при которых значение показателя эффективности  $\mathfrak{e}_{j_2} \in \mathfrak{E}$  можно считать удовлетворительным, а реализацию СТП еще достаточно эффективной;  $p_{j_1, j_2}(\max)$  – максимальные значения параметров управления  $p_{j_1, j_2} \in P$ , при которых достигается максимально возможная оценка показателя эффективности СТП  $\mathfrak{e}_{j_2} \in \mathfrak{E}$ .

Таким образом, аналитические зависимости показателей эффективности  $\mathfrak{e}_{j_2} \in \mathfrak{E}$  СТП от параметров управления  $p_{j_1, j_2} \in P$  в общем виде можно определить следующим образом:

$$\mathfrak{E}_{j_2}(P_{j_2}) = F_{j_2}(p_{1, j_2}, p_{2, j_2}, \dots, p_{n_{j_2}, j_2}), \quad (1)$$

где  $p_{1, j_2}, p_{2, j_2}, \dots, p_{n_{j_2}, j_2} \in P_{j_2}$ ,  $P_{j_2} \subseteq P$  – подмножество параметров управления СТП, влияющих на  $\mathfrak{e}_{j_2} \in \mathfrak{E}$  показатель его эффективности.

Отсюда, множество значений показателей эффективности  $\mathfrak{e}_{j_2} \in \mathfrak{E}$  СТП можно рассматривать как совокупность, включающую  $m_2$  величин, зависящих от различных параметров управления  $p_{j_1} \in P$ , характеризующих текущее состояние технологического процесса на производственном предприятии. Следовательно, исходя из высокой

сложности технологических процессов в заданной области, как объекта управления, для построения аналитических зависимостей (1) показателей его эффективности  $\varepsilon_{j_2} \in \mathcal{E}$ , следует учитывать:

- достаточно большое количество параметров управления  $P_{j_2} \subseteq P$ ;

- высокий уровень неопределенности окружающей СТП среды, связанный со спонтанно возникающими в ней возмущающими факторами.

Другими словами, любой сложный объект управления, функционирующий в обозначенных выше условиях, фактически работает в окружающей среде, характеризующейся нестохастической неопределенностью [12] или в среде со спонтанно происходящими в ней изменениями. Таким образом, получить достоверные статистические данные, позволяющие адекватно отразить процесс функционирования СТП в нестабильной окружающей среде на достаточном для сбора требуемого объема статистики отчетном периоде времени, не представляется возможным. В этой связи на основе статистических данных невозможно также построить

и адекватную аналитическую зависимость показателей эффективности  $\varepsilon_{j_2} \in \mathcal{E}$  от значений, влияющих на них параметров управления  $P_{j_2} \subseteq P$  СТП. Следует также отметить, что, как правило, в таких условиях для принятия решений используются методы, основанные на получении и обработке экспертных данных [12].

К одному из эффективных подходов решения данной подзадачи, связанной с построением адекватных аналитических зависимостей различных показателей эффективности  $\varepsilon_{j_2} \in \mathcal{E}$  СТП от влияющих на них параметров управления  $P_{j_2} \subseteq P$ , следует отнести построение лингвистических функций [13] на основе псевдостатистики, полученной экспертным путем, и ее обработки методами регрессионного анализа. В этом случае лингвистическая функция  $L\Phi(\varepsilon_{j_2})$ , соответствующая

$\varepsilon_{j_2} \in \mathcal{E}$  показателю эффективности СТП будет определяться следующей шестеркой:

$$L\Phi(\varepsilon_{j_2}) = (H_{j_2}, L\Pi(\varepsilon_{j_2}), \{L\Pi(p_{j_1, j_2} \in P_{j_2})\}, M_{j_2}^1, M_{j_2}^2, F_{j_2}(P_{j_2}))$$

где  $H_{j_2}$  – название лингвистической функции, которое совпадает с наименованием определяемого ее показателя эффективности  $\varepsilon_{j_2}(P_{j_2})$ ;  $L\Pi(\varepsilon_{j_2})$  – зависимая переменная лингвистической функции, которая определяется лингвистической переменной, построенной на основе экспертных данных для показателя эффективности  $\varepsilon_{j_2}(P_{j_2})$  [14];

$\{L\Pi(p_{j_1} \in P_{j_2})\}$  – множество независимых переменных лингвистической функции, элементы которого определяются лингвистическими переменными, сформированными на основе экспертных данных для каждого параметра управления  $p_{j_1, j_2} \in P_{j_2}$  с учетом его заданных предельных значений

$p_{j_1, j_2}(\min) \leq p_{j_1, j_2} \leq p_{j_1, j_2}(\max)$ ;  $M_{j_2}^1$  – матрица лингвистической функции, устанавливающая соответствие между различными нечеткими значениями зависимой переменной  $\varepsilon_{j_2}(P_{j_2})$  или термами соответствующей лингвистической переменной и набором соответствующих им нечетких значений независимых переменных  $p_{j_1, j_2} \in P_{j_2}$ , которые определяются экспертным путем в виде термов соответствующих им лингвистических переменных. Строки данной матрицы помечаются номерами экспертов, участвующих в оценке, а столбцы – различными переменными состояниями СТП и исследуемым показателем эффективности  $\varepsilon_{j_2}(P_{j_2})$ ;

$M_{j_2}^2$  – матрица лингвистической функции, устанавливающая соответствие между количественными оценками зависимой переменной или показателя эффективности  $\varepsilon_{j_2}(P_{j_2})$  и набором оценок независимых переменных  $p_{j_1, j_2} \in P_{j_2}$ , которые определяются по максимумам функций

принадлежности нечетких множеств, соответствующих термам описывающих их лингвистических переменных, являющихся элементами матрицы  $M_{j_2}^1$ ;  $F_{j_2}(P_{j_2})$  – график или аналитическая связь между зависимой и независимыми переменными лингвистической функции, строящаяся по данным матрицы  $M_{j_2}^2$ , полученным экспертным путем, на основе их обработки как псевдостатистических данных методом множественного регрессионного анализа.

На первом этапе построения графика  $F_{j_2}(P_{j_2})$  целесообразно рассмотреть его линейную зависимость следующего вида:

$$\varepsilon_{j_2}(P_{j_2}) = a_1 p_{j_2, 1} + a_2 p_{j_2, 2} + \dots + a_{n_{j_1}} p_{j_2, n_{j_1}},$$

адекватность которой проверяется по критериям Фишера и Стьюдента [12]. Если такая проверка показывает, что полученная эмпирическая модель зависимости показателя эффективности  $\varepsilon_{j_2}(P_{j_2})$  от параметров управления СТП является неадекватной, то переходят к подбору адекватной нелинейной зависимости графика  $L\Phi F_{j_2}(P_{j_2})$ .

Таким образом, графики  $F_{j_2}(P_{j_2})$  построенных  $L\Phi$  позволяют провести визуализацию зависимостей различных показателей эффективности  $\varepsilon_{j_2} \in \mathcal{E}$  сложного технологического процесса от параметров управления  $p_{j_1} \in P$ . Кроме того, используя метод цепной подстановки [15], можно установить наиболее чувствительные параметры управления с точки зрения их влияния на значения различных показателей эффективности  $\varepsilon_{j_2} \in \mathcal{E}$  СТП и, на этой основе, ускорить процесс достижения требуемых их значений.

**Методика оценки комплексной эффективности и оптимального управления реализацией технологических процессов**

Найденные экспертным путем аналитические зависимости показателей эффективности  $\varepsilon_{j_2} \in \mathcal{E}$  СТП от влияющих на них параметров управления  $p_{j_1 j_2} \in P_{j_2}$ , позволяют получить и отобразить на графике изменение интегрального показателя эффективности  $\mathcal{E}(P)$  функционирования технологического процесса в целом, которое можно получить в результате отработки комплекса управляющих воздействий  $k$ . Для этого на первом этапе оценки для каждого показателя эффективности  $\varepsilon_{j_2} \in \mathcal{E}$  и альтернативного комплекса управляющих воздействий  $k$  на соответствующие этому показателю параметры управления  $p_{j_1 j_2} \in P_{j_2}$ , на основе принципа гибкого приоритета определяется интегральный показатель эффективности СТП  $\mathcal{E}_k(P)$  следующим образом:

$$\mathcal{E}_{k}(P) = \sum_{j_2=1}^{m_2} \beta_{j_2,k} \mathcal{E}_{j_2,k}(P_{j_2,k}),$$

где  $\beta_{j_2,k}$  – коэффициент влияния  $\mathcal{E}_{j_2,k}(P_{j_2,k})$  показателя эффективности на интегральную оценку эффективности  $\mathcal{E}_k(P)$  СТП, которую можно получить в результате отработки  $k$  комплекса управленческих мероприятий.

Необходимо отметить, что коэффициенты  $\beta_{j_2,k}$  определяются экспертным путем таким образом, чтобы они удовлетворяли следующим общепринятым условиям:

$$0 \leq \beta_{j_2,k} \leq 1; \sum_{j_2=1}^{m_2} \beta_{j_2,k} = 1. \quad (2)$$

Следовательно, оценивая значения интегрального показателя эффективности будущего состояния СТП, в которое он может перейти в результате отработки комплекса управленческих воздействий  $k$ , технолог, опираясь на полученные таким образом данные, представленные в виде графиков  $\mathcal{E}_k(P)$ , может выявить наилучшее состояние, которое обеспечивает максимальную эффективность его реализации, решая следующую оптимизационную задачу:

$$k : \max_{k=1}^z \mathcal{E}_k(P),$$

где  $z$  – множество рассматриваемых технологом СТП альтернативных  $k$  комплексов управленческих воздействий.

Рассмотрим случай, когда множество дифференциальных показателей эффективности  $\varepsilon_{j_2} \in \mathcal{E}$  СТП разбивается на следующие подмножества или классы, в соответствии с определенным направлением их оптимизации:

$$\mathcal{E}(\max) \subseteq \mathcal{E}, \quad \mathcal{E}(\max) = \{\varepsilon_{j_3}\}, j_3 = \overline{1, m_3} \quad -$$

подмножество максимизируемых показателей эффективности СТП, например, производительность технологической линии в единицу времени и т.п.;

$$\mathcal{E}(\min) \subseteq \mathcal{E}, \quad \mathcal{E}(\min) = \{\varepsilon_{j_4}\}, j_4 = \overline{1, m_4} \quad -$$

подмножество показателей эффективности СТП подлежащих минимизации, например, себестоимость одной условной единицы производимой продукции и т.п.;

$$\mathcal{E}(\text{const}) \subseteq \mathcal{E}, \quad \mathcal{E}(\text{const}) = \{\varepsilon_{j_5}\}, j_5 = \overline{1, m_5} \quad -$$

подмножество показателей эффективности СТП, для которых требуется обеспечить фиксированные значения, например, нормы расхода материальных ресурсов на изготовление одной условной единицы производимой продукции и т.п.

В этом случае, задача оптимального управления СТП сводится к определению таких значений  $p_{j_1}^*$

параметров управления  $p_{j_1} \in P$  на каждом этапе реализации технологического процесса, при которых различные дифференциальные показатели его эффективности принимают следующие значения:

$$\varepsilon_{j_3}(P_{j_3}^*) \rightarrow \max, j_3 = \overline{1, m_3};$$

$$\varepsilon_{j_4}(P_{j_4}^*) \rightarrow \min, j_4 = \overline{1, m_4};$$

$$\varepsilon_{j_5}(P_{j_5}^*) = \varepsilon_{j_5}^*, j_5 = \overline{1, m_5},$$

где  $P_{j_3}^*, P_{j_4}^*, P_{j_5}^* \subseteq P$  – подмножества параметров управления СТП, соответственно влияющих на показатели эффективности  $\varepsilon_{j_3}(P_{j_3}^*)$ ,  $\varepsilon_{j_4}(P_{j_4}^*)$  и  $\varepsilon_{j_5}(P_{j_5}^*)$ ;  $\varepsilon_{j_5}^*$  – заданные значения показателей эффективности  $\varepsilon_{j_5}(P_{j_5}^*)$ .

Таким образом, имеет место задача многокритериальной оптимизации в условиях неопределенности, в которой часть показателей подлежит максимизации, а часть – минимизации при заданном множестве ограничений типа равенства, которые определяются показателями эффективности СТП  $\mathcal{E}(\text{const}) \subseteq \mathcal{E}$ .

Следует отметить, что известные методы многокритериальной оптимизации в условиях неопределенности, в том числе основанные на применении математического аппарата нечетких множеств, например, [16, 17, 18], не позволяют обеспечить эффективное решение сформулированной выше многокритериальной задачи при разнонаправленной оптимизации заданных критериев. Иначе говоря, они предусматривают свертку многокритериальной задачи к однокритериальной только в случае, когда все критерии подлежат либо максимизации, либо минимизации.

В этой связи, для решения сформулированной выше многокритериальной задачи оптимизации предлагается использовать следующую ее свертку  $W(P)$  к однокритериальной задаче [13]:

$$W(P) = \left( \sum_{j_3=1}^{m_3} \varepsilon_{j_3}(P_{j_3}^*) - \sum_{j_4=m_3+1}^{m_4} \varepsilon_{j_4}(P_{j_4}^*) \right) \rightarrow \max \quad (3)$$

При этом задача оптимизации (3) решается с учетом функциональных ограничений в виде заданного множества равенств:

$$\vartheta_{j_5}(P_{j_5}^*) = \vartheta_{j_5}^*, j_5 = \overline{1, m_5}.$$

Для решения полученной таким образом однокритериальной многопараметрической оптимизационной задачи (3) целесообразно использовать метод неопределенных коэффициентов Лагранжа [19].

Таким образом, для оптимального управления процессом реализации СТП, технолог, опираясь на полученные оптимальные значения параметров состояния  $p_{j_1}^*, j_1 = \overline{1, m_1}$ , может определить, пронаблюдать и дать указания оператору на отработку такого комплекса управленческих воздействий  $k$ , который позволяет обеспечить максимально возможную эффективность его

дальнейшего течения в нестабильной окружающей среде.

### Заключение

Таким образом, на основе предложенных безотносительно к конкретной предметной области методических положений оценки эффективности сложных технологических процессов в реальном времени, а также визуализации результатов оптимального управления процессом его перехода из текущего состояния в наиболее эффективное состояние, может быть разработана структура программного обеспечения, позволяющего организовать оптимальное управление процессом реализации различных по сложности и содержанию технологических процессов в различных производственных сферах.

### Литература

1. Виноградов Г. П. Методы и алгоритмы принятия решений в автоматизированных системах управления производствами с непрерывной технологией на основе субъективных представлений: монография. Тверь: ТГТУ, 2013. 256 с.
2. Корнеев А.М., Наги А.М. Моделирование сложных технологических процессов с использованием сетей Петри // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 9-3. С. 410-414.
3. Шестаков А.М. Моделирование программы таксономии технологий изготовления деталей машиностроительного профиля с помощью сетей Петри. Программные продукты и системы. 2014. № 2 (106). С. 161–164.
4. Маслаков М.П., Дедегкаев А.Г. Метод модификации сетей Петри при построении управляющих моделей сложных технологических процессов. Перспективы науки. 2016. № 3 (78). С. 39-45.
5. Гоголь И.В., Ремизова И.А., Сыроковашин В.В., Фокин А.П. Адаптивное управление технологическими процессами с запаздыванием по управлению. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического университета (технического университета). 2021. № 57. С. 90-97.
6. Бахтадзе Н.Н., Лотоцкий В.А. Современные методы управления производственными процессами. Проблемы управления. 2009. № 3.1. С. 56-63.
7. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений. М.: Мир, 1976. 168 с.
8. Борисов А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.
9. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. 2-е изд. М.: БИНОМ, 2013. 798 с.
10. Darwish, A., Poleshchuk, O., Komarov, E. A New Fuzzy Linear Regression Model for a Special Case of Interval Type-2 Fuzzy Sets Applied. Mathematics and Information Sciences. 2016. Vol. 10, Iss. 3. P. 1209-1214.
11. Абдурагимов Т.Т., Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Информационно-аналитическая модель нечеткого ПИД регулятора. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Т. 44, № 1. С. 48—60.
12. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее приложения. М.: Наука, 1991. 384 с.
13. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Управление эффективной реализацией технологических процессов механической обработки деталей в машиностроении. Проблемы управления. 2020. № 1. С. 71-82.
14. Флегонтов А.В., Вилков В.Б., Черных А.К. Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных. М.: Лань, 2020. 332 с.
15. Драйвер Н. Прикладной регрессионный анализ: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2016. 912 с.
16. Абдулкеримов И.Т. Факторный анализ и методика цепной подстановки. Актуальные вопросы экономики и управления. 2015. Т. 10. № 2. С. 7-12.
17. Noghin V.D. Pareto Set Reduction Based on Some Metrics. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2017. Vol. 57(4). P. 645-652.
18. Kilic, M., & Kaya, I. Investment project evaluation by a decision making methodology based on type-2 fuzzy sets. Applied Soft Computing. 2015. Vol. 27. P.399-410.
19. Johnpaul C.I., Munaga V.N., Prasad K., Nickolas S., Gangadharana G.R. Fuzzy representational structures for trend based analysis of time series clustering and classification. Knowledge-Based Systems. 2021. Vol. 222. P. 106991.
20. Цирмин А.М. Методы оптимизации для инженеров. М.: Директ-Медиа, 2015. 214 с.

### References

1. Vinogradov G. P. Metody i algoritmy prinjatija reshenij v avtomatizirovannyh sistemah upravlenija proizvodstvami s nepreryvnoj tehnologiej na osnove subektivnyh predstavlenij: monografija. Tver': TGTU, 2013. 256 s.
2. Korneev A.M., Nagi A.M. Modelirovanie slozhnyh tehnologicheskikh processov s ispol'zovaniem setej Petri. Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2016. № 9-3. P. 410-414.

3. Shestakov A.M. Modelirovanie programmy taksonomii tehnologij izgotovlenija detalej mashinostroitel'nogo profilja s pomoshh'ju setej Petri. Programmnye produkty i sistemy. 2014. № 2 (106). P. 161–164.
4. Maslakov M.P., Dedegkaev A.G. Metod modifikacii setej Petri pri postroenii upravljajushhijh modelej slozhnyh tehnologicheskijh processov. Perspektivy nauki. 2016. № 3 (78). P. 39-45.
5. Gogol' I.V., Remizova I.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.P. Adaptivnoe upravlenie tehnologicheskimi processami s zapazdyvanijem po upravleniju. Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta (tehnicheskogo universiteta). 2021. № 57. P. 90-97.
6. Bahtadze N.N., Lototsky V.A. Contemporary methods of production process control. Control Sciences. 2009. No. 3.1. P. 56–63.
7. Zade, L. Ponyatie lingvisticheskoi pere-mennoi i ego primenenie dlya prinyatiya priblizhennykh reshe-nii. M.: Mir, 1976. 168 p.
8. Borisov A.N. Obrabotka nechetkoi informatsii v sistemakh prinyatiya reshenii. M.: Radio i svyaz', 1989. 304 p.
9. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Heidelberg: Physica-Verlag, 2003. 728 p.
10. Darwish A., Poleshchuk, O., Komarov, E. A New Fuzzy Linear Regression Model for a Special Case of Interval Type-2 Fuzzy Sets Applied. Mathematics and Information Sciences. 2016. Vol. 10, Iss. 3. P. 1209-1214.
11. Abduragimov, T.T., Melekhin, V.B., Hachumov, V.M. Information-analytical model for a fuzzy proportionalintegral-derivative controller. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2017. Vol. 44, № 1. P. 48-60.
12. Ventcel' E.S., Ovcharov L.A. Teorija sluchajnyh processov i ee prilozhenija. M.: Nauka, 1991. 384 s.
13. Melehin V.B., Hachumov V.M. Upravlenie jeffektivnoj realizaciej tehnologicheskijh processov mehanicheskoi obrabotki detalej v mashinostroenii. Problemy upravlenija. 2020. № 1. S. 71-82.
14. Flegontov A.V., Vilkov V.B., Chernyh A.K. Modelirovanie zadach prinjatija reshenij pri nechetkijh ishodnyh dannyh. M.: Lan', 2020. 332 s.
15. Drajver N. Prikladnoj regressionnyj analiz: Per. s ang. M.: Vil'jams, 2016. 912 s.
16. Abdulkerimov I.T. Faktornyj analiz i metodika cepnoj podstanovki. Aktual'nye voprosy jekonomiki i upravlenija. 2015. T. 10. № 2. S. 7-12.
17. Noghin V.D. Pareto Set Reduction Based on Some Metrics. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2017. Vol. 57(4). P. 645-652.
18. Kilic, M., & Kaya, I. Investment project evaluation by a decision making methodology based on type-2 fuzzy sets. Applied Soft Computing. 2015. Vol. 27. P.399-410.
19. Johnpaul C.I., Munaga V.N., Prasad K., Nickolas S., Gangadharana G.R. Fuzzy representational structures for trend based analysis of time series clustering and classification. Knowledge-Based Systems. 2021. Vol. 222. P. 106991.
20. Cirmin A.M. Metody optimizacii dlja inzhenerov. M.: Direkt-Media, 2015. 214 s.

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

**Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, Дагестанский государственный технический университет. 367015, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, e-mail: pashka1602@rambler.ru.

**Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Computer Engineering and Automated Systems Software, Daghestan State Technical University. 367015, Republic of Daghestan, Makhachkala, I. Shamil Ave., 70, e-mail: pashka1602@rambler.ru.

**Гамид Хайбулаевич Ирзаев**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, Дагестанский государственный технический университет. 367015, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, e-mail: irzajev@mail.ru.

**Gamid Kh. Irzaev**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Automated Systems Software, Daghestan State Technical University. 367015, Republic of Daghestan, Makhachkala, I. Shamil Ave., 70, e-mail: irzajev@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 04.01.2022; одобрена после рецензирования 28.01.2022, принята к публикации 24.02.2022.

The article was submitted 04.01.2022; approved after reviewing 28.01.2022; accepted for publication 24.02.2022.

Научная статья

УДК 656.62: 504.4.054

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.020>

## Анализ смещения участков концентрации транспортных происшествий в пространстве и времени в границах Волжского бассейна

О.Л. Домнина<sup>1</sup> o-domnina@yandex.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта,

**Аннотация.** Данная работа является продолжением статьи авторов 2020 года. В статье рассматриваются задачи по определению границ участков концентрации транспортных происшествий в пределах территории Волжского бассейна. Для этого созданы в границах Волжского бассейна три базы данных по транспортным происшествиям: с периодами наблюдений 1980-2008, 2007-2018 и 1980-2018 лет. Для определения границ участков концентрации транспортных происшествий применялся расчет плотности транспортных происшествий на участках, сопоставление полученных данных с усредненными и распределения плотности происшествий. В результате выполненной работы были не только определены границы участков по каждому периоду, но и проанализировано изменение границ участков во времени. В работе также введено понятие смещения участков концентрации и прописана методика его определения. Анализ смещения участков концентрации транспортных происшествий позволил разработать классификацию опасных участков, сделать предложения по учету временного фактора при анализе статистических данных для совершенствования методик анализа риска транспортных происшествий и разработке системы мер реагирования.

**Ключевые слова:** транспортные происшествия, участки аварийности, водный транспорт, смещение участков, классификация смещения участков концентрации

**Для цитирования:** Домнина О.Л. Анализ смещения участков концентрации транспортных происшествий в пространстве и времени в границах Волжского бассейна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 151—159

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.020>

## Analysis of the displacement of areas of concentration of traffic accidents in space and time within the boundaries 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.** This work is a continuation of the article by the authors of 2020, which considers the tasks of determining the boundaries of areas of concentration of traffic accidents within the territory of the Volga basin. For this, three databases on transport accidents have been created within the boundaries of the Volga basin: with observation periods of 1980-2008, 2007-2018 and 1980-2018. To determine the boundaries of the concentration areas of traffic accidents, the calculation of the density of traffic accidents at the sections, comparison of the obtained data with the averaged ones and the distribution of the density of accidents were used. As a result of the work performed, the boundaries of the plots were not only determined for each period, but also the change in the boundaries of the plots in time was analyzed. The work also introduces the concept of displacement of concentration sites and spelled out a method for its determination. The analysis of the displacement of the concentration areas of transport accidents made it possible to develop a classification of hazardous areas, to make proposals for taking into account the time factor in the analysis of statistical data to improve the methods for analyzing the risk of traffic accidents and to develop a system of response measures of statistical data to clarify the methods for analyzing the risk of traffic accidents and develop a response system.

**Keywords:** traffic accidents, accident areas, water transport, displacement of areas, classification of displacement of concentration areas

**For citation:** Olga L. Domnina, Analysis of the displacement of areas of concentration of traffic accidents in space and time within the boundaries of the Volga basin, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 151—159

### Введение

Для оценки риска транспортных происшествий и разработки системы мероприятий по реагированию в случае наступления аварийной ситуации на водном транспорте необходимым элементом являются выявление участков аварийности, анализ их изменения во времени и пространстве, их классификация.

Исследованиям в области определения участков концентрации транспортных происшествий

посвящены работы иностранных и отечественных авторов. В большинстве исследований основное внимание сосредоточено на определении границ таких участков аварийности (концентрации транспортных происшествий) [1,2,3,4,5,6,7,8]. В работах [1,7,8] для оценки риска рассчитываются коэффициенты аварийности, часть авторов определяют вероятность аварий с учетом плотности движения судов и частоты их столкновений [2,3,4,5,6].



Ряд исследований связан с изучением факторов, оказывающих влияние на возникновение и тяжесть последствий транспортных происшествий (ТП) [9-18].

Литературный обзор выявил отсутствие ранее выполненных исследований, посвященных комплексному изучению изменчивости участков аварийности, что позволило начать исследования, посвященные анализу изменений участков концентрации ТП в пространстве и времени. Началом таких исследований послужила ранее выполненная работа [19], но в ней анализ изменений границ участков концентрации был выполнен только на примере республики Татарстан. Данная статья является ее продолжением.

Целью данной работы является оценка смещения границ участков концентрации ТП в пространстве и времени.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- собрать статистические данные по ТП в границах Волжского бассейна в периоды 1980-2008 и 2007-2018 годы;
- выявить участки концентрации ТП в рассматриваемых периодах;
- разработать методику определения смещений участков в пространстве и времени;
- проанализировать смещение участков концентрации ТП в пространстве и времени.

#### Материалы и методы

При определении границ укрупненных участков ТП анализировались следующие временные периоды:

- 1) данные по ТП за период наблюдения 1980-2008 годы и за период с 1980 по 2018 гг;
- 2) данные по ТП за период наблюдения 1980-2008 годы и за период с 2007 по 2018 гг;
- 3) данные по ТП за период наблюдения 1980-2018 годы и за период с 2007 по 2018 гг;

Статистические данные собирались для рек в границах Волжского бассейна.

В исследовании вводится новое понятие **смещения участка концентрации ТП**. Под ним понимается изменение выявленных ранее границ участков концентрации ТП. Необходимость введения такого понятия обусловлена необходимостью классификации устойчивости участков аварийности (концентрации ТП) для ее учета при определении рисков ТП, прогноза убытков на внутренних водных путях, разработке комплекса мер предупреждения возможных убытков.

Предлагаемая методика определения смещений участков в пространстве и времени показана на рис.1.

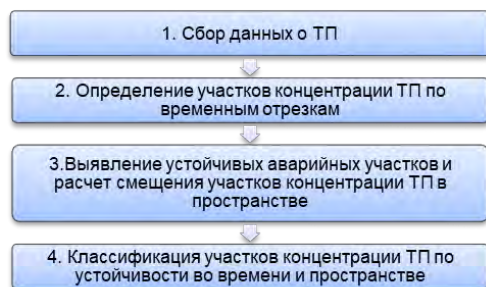


Рис.1. Методика определения смещений участков в пространстве и времени

Как видно из рис.1 она включает четыре этапа.

1. Сбор официальных данных о количестве ТП посредством запросов. Запрашиваемыми данными является информация о месте и дате ТП, вид ТП, его причины происшествия и последствия.

2. На основании собранных данных за анализируемые периоды наблюдения - определение количества участков аварийности; координаты центров участков (выборочная средняя координат, граница участков) согласно известным методикам [20,21].

3. Сопоставление данных в разные временные отрезки выполнялось посредством расчета абсолютного и относительного смещения участков.

Абсолютное смещение участков концентрации ТП определяется как разница координат центров участков:

$$\Delta CM_a = |K_1^{cp} - K_2^{cp}|, \quad (1)$$

где  $K_1^{cp}, K_2^{cp}$  - соответственно выборочная средняя координаты ТП в первый и второй рассматриваемый период, км.

Если участок аварийности пропал или появился новый, то для расчета абсолютного смещение применяются координаты центров ближайших участков в рассматриваемых выборках.

Относительное смещение участков концентрации ТП

$$\Delta CM_{отн} = \frac{\Delta CM_a}{(|K_1^H - K_1^K| + |K_2^H - K_2^K|)/2} \cdot 100 \quad (2)$$

Здесь  $K_1^H, K_1^K, K_2^H, K_2^K$  - соответственно координаты начала и конца укрупненного участка концентрации ТП в первый и второй временной период.

Анализ получившихся данных позволяет выявить устойчивые, пропавшие и новые участки, появившиеся со временем.

4. Формирование классификации участков аварийности начинается с группировки участков с использованием формулы Стерджиса и поправки Йетса [20-21]. Далее, предлагается проверка гипотезы о нормальности эмпирического распределения смещений участков концентрации ТП. Затем, для получения описательных характеристик групп (классов) участков целесообразно определение в каждой группе математического ожидания и среднеквадратичного отклонения или медианы и процентиля.

#### Результаты и обсуждение

Для определения частоты возникновения ТП автором была накоплена совокупная база данных по ТП в границах Волжского бассейна. Данные для формирования такой базы составлены на основании информации Ространснадзора, поданной по запросу ФГБОУ ВО «ВГУВТ» и включали: место и дату ТП, судно-источник ТП, вид аварии, причины происшествия, его последствия. Всего база данных содержит 2911 ТП (2166 ТП по реке Волга, 421 ТП по реке Кама и 324 ТП на гидротехнических сооружениях).

При этом формируемая база включала информацию за периоды: за период наблюдения 1980-2008 годы и за период наблюдения с 2007 по 2018 гг.

Сначала рассматривалась плотность аварийности на речных, озерно-речных и озерных участках водного пути реки Волга [19]. Затем, применяя метод пятичленной скользящей средней, полученные данные по плотности аварийности усреднялись с целью определения границ участков повышенной концентрации ТП. После этого проверялась гипотеза о нормальности эмпирического распределения количества ТП на участках концентрации. Если распределение исследуемой случайной величины характеризуется законом нормального распределения, то данный участок является участком концентрации ТП. Если распределение случайной величины было отлично от нормального, то делался вывод о существовании как минимум двух участков аварийности и, следовательно, участок дробился на более мелкие.

Для определения границ участков аварийности в работе сравнивались значения плотности ТП на участках водного пути с различными условиями формирования рисков возникновения ТП и усредненного количества ТП на i-том километре реки за ряд лет.

В результате обработки информации описанным образом из этих баз были получены следующие результаты по количеству участков аварийности:

- за 1980-2008 г. - 103 участка аварийности;
- за период 2007-2018 г – 37 участков аварийности;
- за объединенный период 1980-2018г. – 102 участка аварийности.

Таким образом видна тенденция снижения участков аварийности, что объясняется в первую очередь значительным снижением объемов перевозок и сокращением количества эксплуатируемого флота (табл.1).

Таблица 1

Динамика объемов перевозок грузов на внутреннем водном транспорте за рассматриваемые периоды

| Годы          | Объем перевозок, млн. т | Годы          | Объем перевозок, млн. т |
|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| 1980          | 481,4                   | 2007          | 153                     |
| 1986          | 549,0                   | 2008          | 151                     |
| 1990          | 582,3                   | 2009          | 97                      |
| 2000          | 117,0                   | 2010          | 102                     |
| 2008          | 151,0                   | 2011          | 126                     |
| Среднегодовой | 376,14                  | 2012          | 141                     |
|               |                         | 2013          | 135                     |
|               |                         | 2014          | 119                     |
|               |                         | 2015          | 121                     |
|               |                         | 2016          | 118                     |
|               |                         | 2017          | 119                     |
|               |                         | 2018          | 116                     |
|               |                         | Среднегодовой | 124,83                  |

Полученные результаты показали необходимость анализа смещения участков концентрации ТП во времени и в пространстве.

Для этого были определены:

- абсолютное смещение границ участков как разница координат центров участков
- относительное смещение границ участков как отношение абсолютного смещения к средней разнице длин участков.

Дополнительно было определено абсолютное и относительное смещение для участков, которые в одном периоде наблюдения представлены, а в другом отсутствуют, или наоборот. Для расчета использовался ближайший по расстоянию участок из сравниваемого периода. Сравнивались данные по следующим периодам:

- 1) периода 1980-2008 годы с периодом наблюдения с 1980 по 2018 гг;
- 2) периода 1980-2008 годы с периодом наблюдения с 2007 по 2018 гг;
- 3) периода 1980-2018 годы с периодом наблюдения с 2007 по 2018 гг;

Фрагменты таблиц по сравнению смещения границ участков представлены соответственно в табл. 2,3 и 4.

Таблица 2

Сопоставление укрупненных участков ТП в границах Волжского бассейна в пространственном и временном аспекте (фрагмент)

| Период наблюдения 1980-2008 |                                      | Субъект РФ       | Период наблюдения 1980-2018 |                                      | Абсолютное смещение, км | Относительное смещение, % |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Граница УКТП, км            | Выборочная средняя координаты ТП, км |                  | Граница УКТП, км            | Выборочная средняя координаты ТП, км |                         |                           |
| 507,8-512,0                 | 509,9                                | Ярославская обл. |                             |                                      | 17,4                    | 424,4                     |
| 527,1-529,3                 | 528,2                                | Ярославская обл. | 525,0-529,0                 | 527,3                                | 0,9                     | 29                        |
| 595,6-599,7                 | 597,7                                | Костромская обл. | 597,0-600,0                 | 598,4                                | 0,7                     | 19,7                      |

| Период наблюдения<br>1980-2008 |   | Субъект РФ           | Период наблюдения 1980-<br>2018 |  | Абсолютно<br>е<br>смещение,<br>км | Относительно<br>е смещение,<br>% |
|--------------------------------|---|----------------------|---------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------------|
| Граница<br>УКТП, км            | Выборочна<br>я средняя<br>координат<br>ы ТП, км |                      | Граница<br>УКТП, км             | Выборочна<br>я средняя<br>координаты<br>ТП, км |                                   |                                  |
| 637,9-<br>639,1                | 638,5   | Костромская обл.     |                                 |  | 40,1                              | 1542,3                           |
| 681,2-<br>682,3                | 681,7   | Ивановская обл.      | 681,0-682,0                     | 681,2  | 0,5                               | 47,6                             |
| 686,2-<br>689,4                | 687,8   | Ивановская обл.      |                                 |  | 6,2                               | 200                              |
| 693,9-<br>695,5                | 694,7   | Ивановская обл.      | 693,0-696,0                     | 694  | 0,7                               | 30,4                             |
| 706,5-<br>709,1                | 707,8   | Ивановская обл.      | 705,0-709,0                     | 707  | 0,8                               | 24,2                             |
| 735,2-<br>740,7                | 738   | Ивановская обл.      |                                 |  | 16,4                              | 385,9                            |
| ...                            |   |                      |                                 |  |                                   |                                  |
| 3037,9-<br>3039,5              | 3038,7  | Астраханская<br>обл. | 3035-3041                       | 3038,1   | 0,6                               | 15,8                             |
| 3045,9-<br>3047,6              | 3046,7  | Астраханская<br>обл. | 3043-3050                       | 3046,2   | 0,5                               | 11,4                             |
| 3054,0-<br>3055,7              | 3054,8  | Астраханская<br>обл/ | 3052-3056                       | 3054,1   | 0,7                               | 24,6                             |

Таблица 3

Сопоставление укрупненных участков ТП в границах Волжского бассейна в пространственном и временном аспекте (фрагмент)

| Период наблюдения<br>1980-2008 |  | Субъект РФ         | Период наблюдения<br>2007-2018 |  | Абсолют<br>ное<br>смещени<br>е, км | Относительн<br>ое смещение,<br>% |
|--------------------------------|--|--------------------|--------------------------------|--|------------------------------------|----------------------------------|
| Граница<br>УКТП, км            | Выборочна<br>я средняя<br>координаты<br>ТП, км |                    | Граница<br>УКТП, км            | Выборочна<br>я средняя<br>координаты<br>ТП, км |                                    |                                  |
| 507,8-512,0                    | 509,9  | Ярославская обл.   |                                |  | 16,1                               | 350                              |
| 527,1-529,3                    | 528,2  | Ярославская обл.   | 524,0-<br>529,0                | 526  | 2,2                                | 61,1                             |
| 595,6-599,7                    | 597,7  | Костромская обл.   |                                |  | 71,7                               | 2019,7                           |
| 637,9-639,1                    | 638,5  | Костромская обл.   |                                |  | 112,5                              | 3629                             |
| 681,2-682,3                    | 681,7  | Ивановская обл.    |                                |  | 155,7                              | 5104,9                           |
| 686,2-689,4                    | 687,8  | Ивановская обл.    |                                |  | 161,8                              | 3946,3                           |
| 693,9-695,5                    | 694,7  | Ивановская обл.    |                                |  | 162,6                              | 12507,7                          |
| 706,5-709,1                    | 707,8  | Ивановская обл.    |                                |  | 149,5                              | 8305,5                           |
| 735,2-740,7                    | 738  | Ивановская обл.    |                                |  | 119,3                              | 3670,8                           |
| 753,2-756,7                    | 755  | Ивановская обл.    |                                |  | 102,3                              | 4546,7                           |
| 811,6-813,4                    | 812,5  | Нижегородская обл. |                                |  | 44,8                               | 3200                             |
| 857,0-858,3                    | 857,6  | Нижегородская обл. | 857,0-<br>858,0                | 857,3  | 0,3                                | 26                               |
| ....                           |  |                    |                                |  |                                    |                                  |
|                                |  | Астраханская обл.  | 2941-2943                      | 2942   | 53,6                               | 2764,1                           |
| 3037,9-<br>3039,5              | 3038,7   | Астраханская обл.  |                                |  | 96,7                               | 5372,2                           |
| 3045,9-<br>3047,6              | 3046,7   | Астраханская обл.  |                                |  | 104,7                              | 5659,5                           |
| 3054,0-<br>3055,7              | 3054,8   | Астраханская обл.  |                                |  | 112,8                              | 6097,3                           |

Таблица 4

Сопоставление укрупненных участков ТП в границах Волжского бассейна в пространственном и временном аспекте (фрагмент)

| Период наблюдения<br>1980-2018 |   | Субъект РФ        | Период наблюдения<br>2007-2018 |   | Абсолютное<br>смещение,<br>км | Относительное<br>смещение, % |
|--------------------------------|---|-------------------|--------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------|
| Граница<br>УКТП, км            | Выборочная<br>средняя<br>координаты<br>ТП, км |                   | Граница<br>УКТП, км            | Выборочная<br>средняя<br>координаты<br>ТП, км |                               |                              |
| 525,0-529,0                    | 527,3   | Ярославская обл.  | 524,0-529,0                    | 526   | 1,3                           | 28,8                         |
| 597,0-600,0                    | 598,4   | Костромская обл.  |                                |   | 72,4                          | 1810                         |
| ...                            |   |                   |                                |   |                               |                              |
|                                |   | Астраханская обл. | 2941-2943                      | 2942  | 54                            | 2700                         |
| 3035,0-3041,0                  | 3038,1  | Астраханская обл. |                                |   | 96,1                          | 2402,5                       |
| 3043,0-3050,0                  | 3046,2  | Астраханская обл. |                                |   | 104,2                         | 2315,6                       |
| 3052,0-3056,0                  | 3054,1  | Астраханская обл. |                                |   | 112,1                         | 3736,7                       |

Большинство участков в первом случае (сравнение данных 1980-2008 и 1980-2018 годов) соответствуют друг другу, но со смещением. В периоде наблюдения с 1980-2018 г. пропали 22 участка, но появились 19 новых участков. Один участок (1814,0-1817,0 км) совпал без смещения.

Для оценки степени смещения группируем участки аварийности, используя формулу Стерджиса

и используя поправку Йетса авторы получили классификацию, проверка групп которой на соответствие нормальному закону распределения подтвердилась для 3 – 5 групп (табл. 5). Поэтому для получения описательных характеристик 3 – 5 групп (классов) участков используем математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение, для 1 и 2 группы – медиану и процентилю

Таблица 5

Классификация участков по смещению в сравнении 1980-2008 и 1980-2018 годов

| № группы | Название группы             | Границы группы, в % смещения | M±SD или Me [5;95] | Участки, входящие в группу  |
|----------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|---|
| 1.       | Стабильные участки          | 1,7-14,44                    | 10,6 [2,3;14,3]    | 857,0-858,3 и 854,0-861,0; 885,3-887,1 и 883,0-889,0; 892,1-894,1 и 890,0-895,0; 911,3-912,6 и 909,0-919,0; 1170,8-1174,6 и 1170,0-1174,0; 1191,3-1193,4 и 1187,0-1196,0; 1234,2-1236,5 и 1232,0-1237,0; 1276,8-1280,1 и 1275,0-1283,0; 1379,9-1383,2 и 1375,0-1386,0; 11399,9-1405,8 и 1398,0-1405,0; 1446,9-1452,7 и 1448,0-1450,0; 1454,7-1459,6 и 1454,0-1460,0; 1470,6-1473,8 и 1469,0-1475,0; 1499,0-1505,2 и 1499,0-1505,0; 1527,2-1530,2 и 1522,0-1536,0; 1736,6-1739,6 и 1731,0-1743,0; 1854,0-1858,7 и 1846,0-1865,0; 1922,5-1924,8 и 1920,0-1927,0; 1953,0-1958,0 и 1954,0-1956,0; 1959,0-1964,0 и 1960,0-1962,0; 2049,6-2051,8 и 2050,0-2051,0; 2182,9-2188,1 и 2183,0-2187,0; 2232,4-2235,0 и 2230,0-2236,0; 2324,0-2329,0 и 2325,0-2327,0; 2552,2-2554,4 и 2550,0-2558,0; 2573,1-2574,6 и 2571,0-2577,0; 2677,1-2680,4 и 2674,0-2683,0; 3045,9-3047,6 и 3043,0-3050,0 |
| 2.       | Умеренно стабильные участки | 14,44-27,18                  | 20,1 [15;25,6]     | 595,6-599,7 и 597,0-600,0; 706,5-709,1 и 705,0-709,0; 753,2-756,7 и 753,0-756,0; 811,6-813,4 и 811,0-813,0; 865,6-867,2 и 862,0-868,0; 1062,3-1067,4 и 1063,0-1066,0; 1103,2-1106,5 и 1103,0-1105,0; 1441,3-1444,0 и 1440,0-1445,0; 1594,3-1597,3 и 1595,0-1596,0; 1642,3-1645,3 и 1643,0-1644,0; 1680,1-1680,8 и 1675,0-1680,0; 1694,7-1698,2 и 1695,0-1697,0; 1833,0-1835,4 и 1833,0-1835,0; 1931,9-1934,7 и 1931,0-1935,0; 1938,3-1944,1 и 1938,0-1942,0; 2193,7-2194,8 и 2192,0-2195,0; 2269,3-2272,3 и 2270,0-2271,0; 2287,7-2290,3 и 2287,0-2290,0; 2579,1-2580,6 и 2578,0-2584,0; 3037,9-3039,5 и 3035,0-3041,0; 3054,0-3055,7 и 3052,0-3056,0   |

| № группы | Название группы        | Границы группы, в % смещения | M±SD или Me [5;95]  | Участки, входящие в группу   |
|----------|------------------------|------------------------------|---------------------|--|
| 3.       | Слабо стабильные       | 27,18-39,92                  | 32,9 ±2,905395      | 527,1-529,3 и 525,0-529,0; 693,9-695,5 и 693,0-696,0; 873,4-874,8 и 871,0-881,0; 905,0-905,9 и 903,0-906,0; 958,4-961,6 и 958,0-960,0; 983,3-987,6 и 985,0-990,0; 1069,3-1069,8 и 1068,0-1070,0; 1112,6-1116,1 и 1110,0-1115,0; 1245,1-1246,5 и 1245,0-1247,0 2012,4-2014,2 и 2010,0-2015,0; 2255,2-2256,4 и 2254,0-2262,0; 2649,4-2652,3 и 2648,0-2652,0; 2722,0-2723,4 и 2720,5-2728,5; 2800,2-2801,0 и 2798,0-2802,0; 2887,5-2889,4 и 2887,0-2889,0 |
| 4.       | С низкой стабильностью | 39,92-52,66                  | 48,583333 ±2,910269 | 681,2-682,3 и 681,0-682,0; 899,8-901,3 и 900,0-902,0; 1124,8-1127,9 и 1120,0-1130,0; 1666,9-1668,1 и 1667,0-1667,0; 1997,9-2000,8 и 2000,0-2000,0; 2124,9-2125,8 и 2124,0-2125,0   |
| 5.       | Нестабильные           | 52,66-90,9                   | 68,4±11,82 0427     | 1289,4-1291,0 и 1288,0-1290,0; 1484,9-1486,1 и 1485,0-1490,0; 1889,3-1895,1 и 1890,0-1891,0; 2166,3-2169,5 и 2159,0-2168,0; 1008,0-1013,6 и 1007,0-1009,0; 1312,2-1313,9 и 1311,0-1313,0; 1619,6-1624,8 и 1618,0-1620,0; 1775,3-1775,6 и 1775,0-1775,0; 1076,2-1077,4 и 1075,0-1076,0  |

Сравнительный анализ данных 1980-2008 и 2007-2018 годов (табл. 3) показал исчезновение 79 участков и появление новых 13 участков. Один участок присутствует в обоих рассматриваемых периодах (884,0-889,0 км).

Для оценки степени смещения после группировки участков с использованием формулы Стерджиса и поправки Йетса автор получила классификацию (табл. 6), проверка групп которой на соответствие нормальному закону распределения подтвердилась (рис.2).

Таблица 6

Классификация участков по смещению в сравнении 1980-2008 и 2007-2018 годов

| № группы | Название группы    | Границы группы, в % смещения | M±SD или Me [5;95]     | Участки, входящие в группу  |
|----------|--------------------|------------------------------|------------------------|---|
| 1.       | Стабильные         | 6-55,6                       | 27,154545 ± 16,644721  | 857,0-858,3 и 857,0-858,0 865,6-867,2 и 862,0-869,0 911,3-912,6 и 908,0-920,0 1069,3-1069,8 и 1069,0-1070,0 1736,6-1739,6 и 1731,0-1743,0 2726,3-2727,8 и 2726,0-2729,0 1276,8-1280,1 и 1277,0-1288,0 1379,9-1383,2 и 1378,0-1382,0 1922,5-1924,8 и 1922,0-1924,0 2573,1-2574,6 и 2574,0-2580,0 |
| 2.       | Условно стабильные | 55,6-80,4                    | 62,15 ± 4,289406       | 527,1-529,3 и 524,0-529,0 873,4-874,8 и 874,0-878,0 905,0-905,9 и 903,0-906,0 1312,2-1313,9 и 1303,0-1313,0 1527,2-1530,2 и 1527,0-1528,0 2166,3-2169,5 и 2160,0-2168,0   |
| 3.       | Нестабильные       | 80,4-154,8                   | 106,566667 ± 25,794702 | 892,1-894,1 и 894,0-899,0 899,8-901,3 и 901,0-902,0 2232,4-2235,0 и 2227,0-2232,0 2552,2-2554,4 и 2550,0-2552,0 2579,1-2580,6 и 2581,0-2584,0 1191,3-1193,4 и 1190,0-1190,0   |

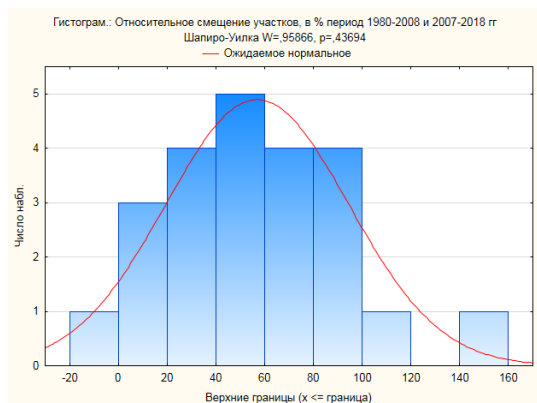


Рис. 2. Гистограмма распределения устойчивости участков при сравнении 1980-2008 и 2007-2018 годов

Гипотеза о нормальном распределении каждой группы подтверждается, поэтому для характеристики группы используется математическое ожидание (выборочная средняя) и среднеквадратичное отклонение (табл. 6).

Третье сравнение баз данных (табл.4) показало исчезновение 71 участка и появление 7 новых. Участок 854,0-861,0 км показал стабильное существование.

В соответствии с уже описанными подходами сравнения укрупненных участков ТП по данным 1980-2018 и 2007-2018 периодов также подтвердило наличие нормального распределения при делении участков смещения на группы и необходимость использования для характеристик группы математического ожидания и среднеквадратичного отклонения (табл. 7).

Таблица 7

Классификация участков по смещению в сравнении 1980-2018 и 2007-2018 годов

| № группы | Название группы        | Границы группы, в % смещения | M±SD или Me [5;95]     | Участки, входящие в группу   |
|----------|------------------------|------------------------------|------------------------|--|
| 1.       | Стабильные             | 0,9-18                       | 6,423077±<br>5,595706  | 862,0-868,0 и 862,0-869,0; 871,0-881,0 и 874,0-878,0; 883,0-889,0 и 884,0-889,0; 903,0-906,0 и 903,0-906,0; 909,0-919,0 и 908,0-920,0; 1068,0-1070,0 и 1069,0-1070,0; 1375,0-1386,0 и 1378,0-1382,0; 1522,0-1536,0 и 1527,0-1528,0; 1731,0-1743,0 и 1731,0-1743,0; 1920,0-1927,0 и 1922,0-1924,0; 2159,0-2168,0 и 2160,0-2168,0; 2793,0-2796,0 и 2792,0-2798,0 |
| 2.       | Условно стабильные     | 18-35,1                      | 28,042857±<br>5,442382 | 525,0-529,0 и 524,0-529,0<br>900,0-902,0 и 901,0-902,0<br>1187,0-1196,0 и 1190,0-1190,0<br>1275,0-1283,0 и 1277,0-1288,0<br>1388,0-1396,0 и 1388,0-1393,0<br>2571,0-2577,0 и 2574,0-2580,0<br>2784,0-2788,0 и 2784,0-2786,0  |
| 3.       | С низкой стабильностью | 35,1-52,2                    | 45,68 ±<br>5,183821    | 1350,0-1358,0 и 1353,0-1365,0<br>1675,0-1680,0 и 1675,0-1677,0<br>2230,0-2236,0 и 2227,0-2232,0<br>2550,0-2558,0 и 2550,0-2552,0<br>2578,0-2584,0 и 2581,0-2584,0  |
| 4.       | Нестабильные           | 52,2-103,5                   | 73,16 ±<br>20,77987    | 896,0-899,0 и 894,0-899,0<br>1303,0-1306,0 и 1303,0-1313,0<br>2720,5-2728,5 и 2726,0-2729,0<br>1311,0-1313,0 и 1314,0-1320,0<br>1314,0-1323,0 и 1322,0-1325,0  |

### Заключение

Таким образом, анализ смещений участков концентрации ТП позволил выявить стабильные участки концентрации ТП, не меняющиеся во времени и пространстве. Это говорит о необходимости обращения на них особого внимания и разработки по отношению к этим участкам системы мер контроля и управления рисками.

Кроме того, проведенные исследования подтвердили необходимость регулярного мониторинга за транспортными происшествиями, с одной стороны, и необходимости учета различных периодов наблюдения в зависимости от целей в системе управления рисками с другой стороны.

Так, для разработки таких мероприятий по снижению транспортных рисков как регулировании

движения и стоянки судов, необходимо анализировать более актуальные данные за последние 10-15 лет. В случае же разработки организационных и технических мероприятий по снижению уровня риска (например, для тренажерной подготовки спасателей, штабных учений и др.), период наблюдений должен охватывать больший интервал (желательно 15-20 лет).

При разработке мероприятий по снижению уровня риска для участков, на которых расположены водозаборы, гидротехнические сооружения атомных электростанций и другие объекты приоритетной защиты целесообразно варьировать различные периоды наблюдения, чтобы выявлять максимальное количество опасных участков с учетом их изменений (период 30 лет и более).

### Литература

1. Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Батанина Е.А., Наумов В.С. Оценка риска возникновения транспортных происшествий на реках в границах республики Татарстан. Морские интеллектуальные технологии. 2019. №4-2 (46). С. 79-84
2. 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), с. 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, с. 286-308 (2017)
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.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 2018 Volume 180 (Cover date: December 2018) Pages 277-289, doi:10.1016/j.res.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.res.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 risk level 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 Fişkin, 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.res.2021.107470
17. Домнина О.Л., Захаров В.Н., Отделкин Н.С., Пластинин А.Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-2 (42). С. 79-86.
18. Решняк В.И., Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Отделкин Н.С. Экологическое обеспечение водного туризма. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 154-160.
19. Батанина Е.А. Бородин. А.Н., Домнина О.Л., Пластинин А.Е. Определение участков концентрации транспортных происшествий с участием судов в республике Татарстан. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-1 (50). С. 161-168
20. 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.
21. Пластинин А.Е. Оценка риска возникновения транспортных происшествий. Речной транспорт (XXI век). 2013. № 3 (62). С. 83-88.

### 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, С. 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; 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. 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
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 2018 Volume 180 (Cover date: December 2018) Pages 277-289, doi:10.1016/j.res.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.res.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 Fişkın, 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.res.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. Ekaterina A. Batanina, Alexey N. Borodin, Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Determination of areas of concentration of transport accidents with the participation of ships in the Republic of Tatarstan, *Marine intellectual technologies*, 2020. №4 part 1. pp. 161-168
20. Borodin A.N. Improving simulator training for oil spill response during the operation of ships on inland waterways, *Science and sustainable development of society. The legacy of V.I. Vernadsky*. 2009. №. 9. p. 259-260.
21. Plastinin A.E. Assessment of the risk of traffic accidents. *River transport (XXI century)*. 2013. №. 3 (62). p. 83-88.

#### **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 17.01.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 27.02.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 27.02.2022.



Научная статья

УДК 629.123

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.021>

## Формирование маршрута движения судна в ограниченной акватории с учетом требования к изменению скорости хода

А.С. Корнев<sup>1</sup> alexey.korenev@sitronics-kt.ru С.П. Хабаров<sup>2</sup> serg.habarov@mail.ru

А.Г. Шпекторов<sup>3</sup> 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** При маневрировании судов возникают задачи управления, которые требуют перехода судна в заданную точку с заданным путевым углом и скоростью хода. Для движения автономных судов в составе группы при этом необходимо формировать траекторию перехода. Кроме того, конечная точка необязательно является статической, ее географические координаты могут зависеть от движения другого судна. Для решения задачи формирования маршрута предложено использовать математический аппарат, связанный с анализом системы Дубинса. Рассмотрены варианты решения задачи построения траектории, оптимальной по времени перехода, с учетом снижения в конечной точке скорости движения до требуемого значения. Показано, что стратегии управления, определяющие искомые траектории с торможением, не всегда могут быть описаны простыми кривыми Дубинса. Предложен нелинейный закон управления, обеспечивающий торможение на криволинейном участке траектории, приведены расчеты траектории в соответствии с выбранным законом. Показано, что стратегия управления с торможением на конечном криволинейном участке траектории обеспечивает минимальное время перехода. Предложен алгоритм расчета траектории для случая подвижной конечной точки, который можно применять для планирования маршрута при движении судов в группе.

**Ключевые слова:** Автономное судовождение, управление траекторией, планирование маршрута, навигация, оптимальное управление, машина Дубинса, групповое движение.

**Для цитирования:** Корнев 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, Номер 1. С. 160—168

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.021>

## Ship's route planning in a limited area with speed changing requirement

Alexei S. Korenev<sup>1</sup> alexey.korenev@sitronics-kt.ru, Sergei P. Khabarov<sup>2</sup> serg.habarov@mail.ru

Andrei G. Shpectorov<sup>3</sup> agshpectorov@etu.ru

<sup>1</sup>Sitronics KT, Saint-Petersburg, Russian Federation <sup>2</sup>St. Petersburg state forest technical university, Russian Federation <sup>3</sup>St. Petersburg electrotechnical university "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation

**Abstract** There are control tasks on the restricted water to relocate the ship to a given waypoint with the given speed and course. For an unmanned ship it is needed to calculate a full route from start waypoint to the end waypoint. Furthermore the end waypoint may not be given as a static point. In the convoy's movement the end waypoint depends on another ship dynamic position. It's suggested to plan the ship route on a basis of Dubins problem. The options of route planning with the slowdown to a given speed in a minimal time are considered. It is shown that control strategy which determine the route may not be described by the simple Dubins curves. The nonlinear control law is presented to obtain a slowdown on the curve, and the corresponding route calculation is described. It is illustrated that the control strategy with the speed slowing on the final curve to the end waypoint gives the minimal time route. In the case of the variable end waypoint the relevant route planning algorithm is suggested. This algorithm allows route planning with respect to convoy's movement.

**Key words.** unmanned navigation, track control, route planning, guidance, optimal control, Dubins system, convoy's movement

**For citation:** Alexei S. Korenev, Sergei P. Khabarov, Andrei G. Shpectorov Ship's route planning in a limited area with speed changing requirement, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 160—168

### Введение

При управлении траекторией движения судна классически следует решить две задачи: планирование маршрута движения и стабилизация положения судна на заданном маршруте. Задачи планирования маршрута в настоящее время возложены на электронно-картографические навигационно-информационные системы, тогда как задачи движения на маршруте совместно с ЭКНИС

решают системы управления движением – авторулевые или системы динамического позиционирования, в зависимости от текущей скорости хода и компоновки органов управления.

Можно отметить, что ЭКНИС относительно слабо приспособлены к решению траекторных задач при условиях движения судна в составе группы. Функции ЭКНИС в части планирования сводятся к уточнению маршрута, заданного набором путевых точек, при допущении постоянства скорости хода на отдельных

участках маршрута. Однако, например, при формировании ледового каравана или при лоцманской проводке, ведомое судно должно занять определенное положение относительно ведущего, и иметь в этой точке определенную скорость, чаще всего равную скорости ведущего судна. Такой переход осуществляется в режиме ручного управления, что объяснимо кратковременностью подобного маневра. Однако в условиях развития автономного судовождения необходимо осуществлять автоматизацию даже кратковременных режимов. Очевидно, что реализация подобной функции планирования маршрута в ЭКНИС может оказаться полезной и эффективной не только для автономных судов.

При планировании траектории маневра судна целесообразно исходить из требования минимального времени такого перехода. Простейшая математическая модель, описывающая перемещение объекта в горизонтальной плоскости с ограничениями по радиусу поворота носит название «машины Дубинса» [1]. Решение оптимальной по быстродействию задачи перевода «машины Дубинса» из одной точки плоскости в другую может являться основой для формирования требуемой траектории. Известно решение задачи для частных случаев при отсутствии [2-4] или наличии [5] постоянных внешних возмущений при условии постоянной скорости хода. Однако требование к изменению скорости при маневрировании обуславливает поиск новых стратегий оптимального перехода. Некоторые из них приводятся в настоящей статье.

#### Формирование оптимальных траекторий на основе стратегий управления

Для формальной постановки задачи рассматривается движение судна в горизонтальной плоскости с ограничением на радиус поворота. Движение объекта на плоскости  $XOY$  описывается системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= V(t) \sin \sigma(t); \\ \frac{dy(t)}{dt} &= V(t) \cos \sigma(t); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = u(t);$$

$$u(t) \in [-U_{max} \dots U_{max}];$$

$$x(t_0) = x_0; y(t_0) = y_0; \sigma(t_0) = \sigma_0; V(t_0) = V_0;$$

$$x(t_k) = x_k; y(t_k) = y_k; \sigma(t_k) = \sigma_k; V(t_k) = V_k;$$

где  $x(t), y(t)$  – координаты центра тяжести объекта в неподвижной системе координат,  $\sigma(t)$  – путевой угол (угол между направлением вектора скорости и направлением на север),  $V(t)$  – путевая скорость движения объекта,  $u(t)$  – скалярный сигнал управления, пропорциональный угловой скорости поворота;  $U_{max}$  – максимальное значение сигнала управления. Требуется найти траекторию движения объекта из некоторой исходной точки  $A(x_0, y_0, \sigma_0, V_0)$  в требуемую конечную точку  $B(x_k, y_k, \sigma_k, V_k)$  за минимальное время  $t_k - t_0$ .

Известно [1], что при постоянной скорости движения объекта ( $V_0 = V_k$ ) управление, которое переводит систему (1) в момент в заданную конечную точку, согласно принципу максимума Понтрягина имеет релейный вид. Соответствующие траектории на плоскости  $XOY$  состоят из конечного числа дуг окружностей и прямолинейных участков. Дубинс показал [3], что существует всего три примитива: S (при  $u(t) = 0$ ); L (при  $u(t) = -U_{max}$ ) и R (при  $u(t) = U_{max}$ ), из шести сочетаний которых могут быть построены все оптимальные траектории:

$$\{RLR, LRL, LSL, LSR, RSL, RSR\} \quad (2)$$

Кратчайший путь между любыми двумя точками всегда можно охарактеризовать одним из этих шести сочетаний, называемых далее стратегиями управления. Они получили название *кривых Дубинса*. Из выражения (2) следует, что переход из любой произвольной точки в любую другую точку можно осуществить не более чем тремя переключениями управляющего сигнала в моменты времени  $t_0, t_1$  и  $t_2$ . Моментам времени  $t_1$  и  $t_2$  на плоскости будут соответствовать две контрольные точки  $P(x_1, y_1, \sigma_1, V_1), Q(x_2, y_2, \sigma_2, V_2)$ , в которых осуществляется переключение управления и переход с одного примитива на другой. Определить точки перехода можно, например, используя геометрический [4] или аналитический [3] подходы.

Данные положения справедливы, если в процессе перемещения по траектории скорость движения не изменяется. Предположим, что скорость в конечной точке должна быть меньше начальной ( $V_k < V_0$ ). Тогда простейшими стратегиями управления могут быть:

1) Снижение скорости движения с  $V_0$  до  $V_k$  на начальном участке траектории без изменения путевого угла  $\sigma_0$ . Тогда необходимо определить координаты точки достижения конечной скорости  $G_a$ , и произвести расчет от этой точки до точки B кривой Дубинса путем определения значений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в точках  $P_1$  и  $Q_1$ .

2) Снижение скорости движения с  $V_0$  до  $V_k$  на конечном участке траектории с постоянным путевым углом  $\sigma_k$ . Тогда, соответственно, нужно определить координаты еще одной контрольной точки  $G_b$ , в которой следует начать снижение скорости, затем рассчитать кривую Дубинса, выводящую в эту точку объект управления из точки A путем определения значений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в точках  $P_2$  и  $Q_2$ .

Примеры реализации этих двух стратегий управления приведены на рис. 1 для двух разных значений путевых углов в конечной точке. Траектории на рис. 1а) соответствуют переходу из точки A (0 м, 0 м, 0°, 10 узлов) в точку B (800 м, 1000 м, 90°, 6 узлов). На рис. 1б) осуществляется переход в эту же точку, но с другим значением конечного путевого угла (800м, 1000м, 135°, 6 узлов). Участки  $AG_1$  и  $GB_2$  соответствуют режиму

торможения длительностью 120 секунд, в точках  $P_i, Q_i$  происходит переход между примитивами.

Общее время движения по траектории перехода из точки А в точку В будет определяться как сумма времени движения по кривым Дубинса и времени  $T_{vk}$ , необходимого для движения по участку

торможения для снижения скорости до заданной величины и с заданной точностью.

Как видно из рис. 1 при разных исходных данных оптимальной по быстрдействию может оказаться любая из этих простейших стратегий управления. Ниже будут рассмотрены более сложные стратегии управления.

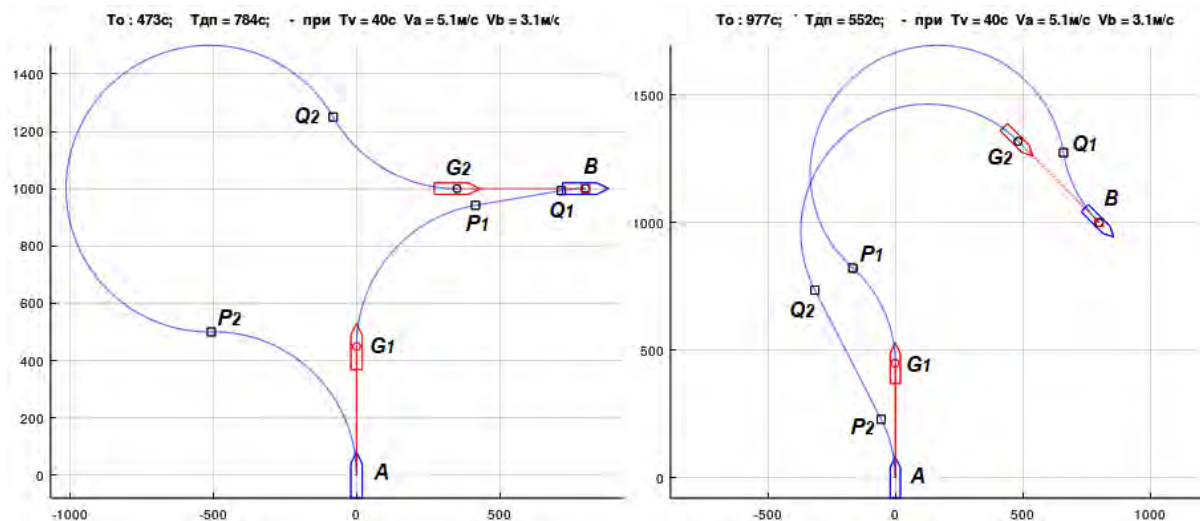


Рис. 1. Пример реализации простейших стратегий управления со снижением скорости

**Алгоритм расчета траекторий при простейших стратегиях управления**

Предположим, что процесс изменения скорости судна может быть описан, либо аппроксимирован аperiодическим звеном с постоянной времени  $\tau$ . В этом случае аналитическое выражение для линейной скорости движения судна на участке торможения будет иметь вид:

$$V(t) = V_k + (V_0 - V_k)e^{-t/\tau}, \text{ где } V_0 > V_k \quad (3)$$

Тогда путь, пройденный судном за время  $T_{vk}$  можно вычислить при помощи интеграла:

$$S = \int_0^{T_{vk}} V(t) dt = V_k T_{vk} + (V_0 - V_k) T_{vk} \left( e^{-T_{vk}/\tau} - 1 \right) \quad (4)$$

Время достижения заданной конечной скорости движения определяется необходимой точностью, т.е. степенью приближения скорости к ее установившемуся значению. Обычно в качестве нижнего предела выбирают значение  $T_{vk} = 3\tau$ , соответствующее времени переходного процесса, который обеспечивает отклонение от заданного значения скорости в пределах 5%.

После вычисления длины пути S по известным координатам точек А и В определяются координаты точек  $G_a$  и  $G_b$ :

$$x_{G_a} = x_0 + S \sin \sigma_0; y_{G_a} = y_0 + S \cos \sigma_0;$$

$$x_{G_b} = x_k - S \sin \sigma_k; y_{G_b} = y_k - S \cos \sigma_k;$$

Теперь, приняв за исходную точку  $G_a(x_{G_a}, y_{G_a}, \sigma_0, V_k)$ , а за конечную точку  $B(x_k, y_k, \sigma_k, V_k)$ , можно использовать один из предложенных в [3,4] подходов и выполнить поиск кривых Дубинса. В результате будут найдены координаты точек  $P_1$  и  $Q_1$ , а также время движения объекта по данной траектории. Таким образом определяется траектория для первой из описанных выше простейших стратегий. Аналогично, оставляя в качестве исходной точку  $A(x_0, y_0, \sigma_0, V_0)$  и принимая в качестве конечной точку  $G_b(x_{G_b}, y_{G_b}, \sigma_k, V_0)$ , можно получить решение и для второй простейшей стратегии.

**Поиск новых эффективных стратегий управления**

Результаты моделирования показывают, что при значительных расстояниях между точками А и В более перспективной по быстрдействию оказывается стратегия, использующая торможение на конечном линейном участке траектории. Логично предположить, что эффективными окажутся стратегии с реализацией торможения на криволинейном участке – уменьшение скорости должно приводить к уменьшению длины дуги циркуляции. Рассмотрим возможности реализации подобных стратегий.

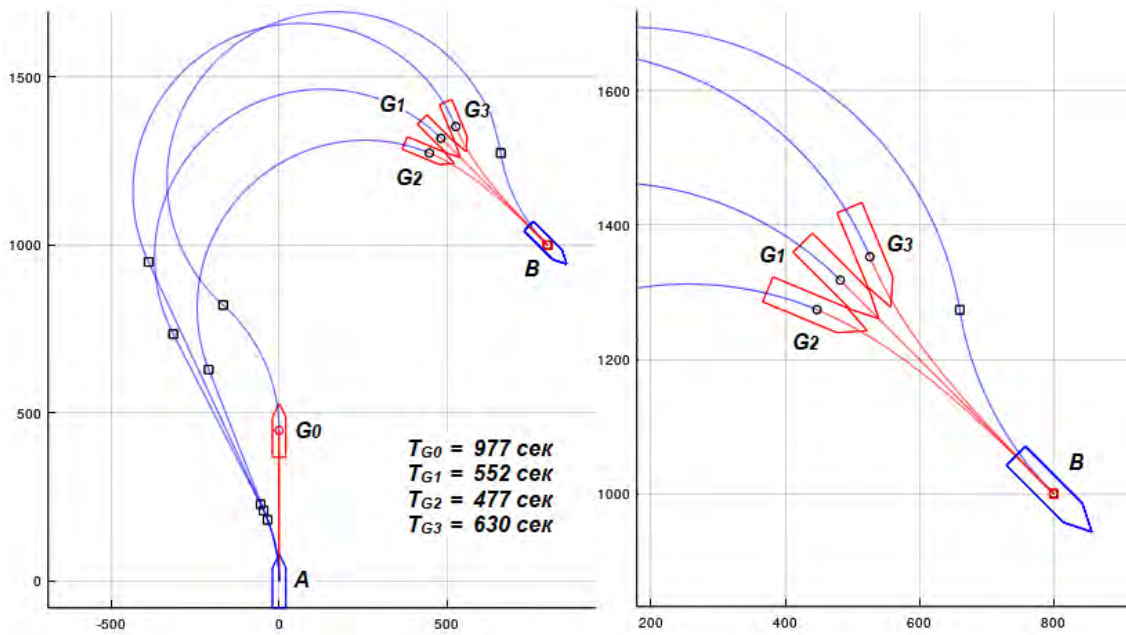


Рис. 2. Пример реализации сложных стратегий управления со снижением скорости

Новые стратегии управления, представленные на рис. 2, соответствуют траекториям, переводящим судно из точку A в точку B (аналогично рис. 1б) через точки  $G_2$  и  $G_3$  – до этих точек движение осуществляется с постоянной линейной и угловой скоростью, в этих точках начинается торможение. В точке  $G_3$ , к тому же, происходит изменение направления поворота. Рассмотренные выше простейшие стратегии соответствуют траекториям, проходящим через точки  $G_0 = G_a$  и  $G_1 = G_b$ .

Результаты моделирования показывают, что стратегия, при которой не требуется изменение направления поворота в точке начала торможения, оказывается более эффективной. Однако для ее реализации необходимо осуществить расчет точки  $G_2$  начала торможения. Можно отметить, что процедура расчета точки  $G_3$  по сути является аналогичной.

Кривизна дуги криволинейного участка определяется радиусом циркуляции  $R$ . До достижения точки  $G_2$  судно движется с постоянной линейной скоростью, поэтому начальная угловая скорость в точке  $G_2$  равна  $U_{max} = V_0/R$ . Из условия одновременности снижения путевой скорости до значения  $V_k$  и угловой скорости до нуля, можно получить следующий закон управления на последнем участке:

$$u(t) = \frac{V_0}{R} e^{-t/\tau}, t \in [0 \dots T_{vk}]. \quad (5)$$

Для определения координат точки  $G_2$ , из которой закон управления (5) переводит судно в точку  $B(x_k, y_k, \sigma_k, V_k)$  за время  $T_{vk}$ , нужно решить вспомогательную задачу расчета относительного перемещения динамической системы (1) из точки  $(0,0,0,V_0)$ . Тогда искомая точка легко может быть найдена с помощью плоского вращения и

параллельного переноса системы координат. Угол плоского вращения составляет

$$\varphi_{ROT} = \sigma_k - \Delta\sigma(T_{vk}) \quad (6)$$

где  $\Delta\sigma(T_{vk})$  – изменение путевого угла. Соответственно, координаты точки  $G_2$  определяются через относительно смещение  $(\Delta x(T_{vk}), \Delta y(T_{vk}))$ :

$$\begin{bmatrix} x_{G_2} \\ y_{G_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \varphi_{ROT} & \sin \varphi_{ROT} \\ -\sin \varphi_{ROT} & \cos \varphi_{ROT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(T_{vk}) \\ \Delta y(T_{vk}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Закон управления (5) задает изменение угловой скорости поворота на интервале времени  $[0 \dots T_{vk}]$ , соответственно изменение путевого угла можно рассчитать через определенный интеграл:

$$\Delta\sigma(T_{vk}) = \int_0^{T_{vk}} (V_0/R) e^{-t/\tau} dt = \frac{V_0\tau}{R} \left( 1 - e^{-T_{vk}/\tau} \right)$$

Соответственно, относительное смещение положения системы (1) определяется выражениями:

$$\Delta x = \int_0^{T_{vk}} V(t) \sin \sigma(t) dt; \quad \Delta y = \int_0^{T_{vk}} V(t) \cos \sigma(t) dt; \quad (8)$$

где

$$V(t) = V_0 e^{-t/\tau} + V_k \left( 1 - e^{-t/\tau} \right);$$

$$\sigma(t) = \frac{V_0\tau}{R} \left( 1 - e^{-t/\tau} \right).$$

Аналитическое вычисление интегралов (8) имеет вид

$$\Delta x = n(Ci(A) - Ci(B)) \sin A - n(Si(A) - Si(B)) \cos A + m(1 - \cos C) \quad (9)$$

$$\Delta y = n(Ci(A) - Ci(B)) \cos A - n(Si(A) - Si(B)) \sin A + m \sin C \quad (10)$$

где

$$A = \frac{V_0 \tau}{R}; B = Ae^{-T_{vk}/\tau}; C = A - B;$$

$$n = V_k \tau; m = \frac{V_0 - V_k}{V_0} R;$$

функции  $Si(x)$  и  $Ci(x)$  – соответственно интегральные синус и косинус, которые могут быть вычислены через знакопеременные ряды:

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{(2n+1)!(2n+1)};$$

$$Ci(x) = \int_x^{\infty} \frac{\cos t}{t} dt = \gamma + \ln x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n}}{(2n)!(2n)};$$

где  $\gamma = 0.57721566$  – постоянная Эйлера-Маскерони [6].

На рис. 3 представлен результат моделирования, выполненный на основе описанного выше алгоритма. Представлен процесс торможения объекта на участке в 120 секунд ( $\tau = 40$  с) при снижении скорости движения с 10 до 6 узлов и уменьшении за этот период угловой скорости с  $35.37^\circ/\text{мин}$  до практически нулевого значения. Интегральные функции вычислены при  $n = 6$ , что обеспечивает достаточную точность для решения интегральных задач.

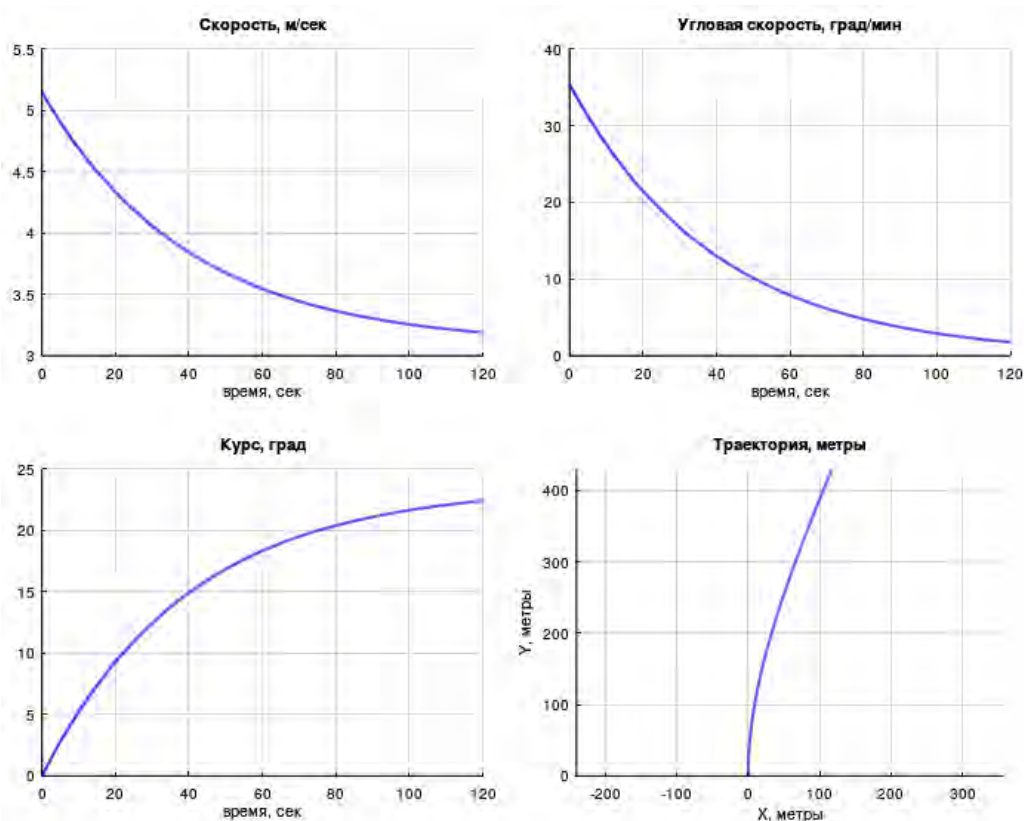


Рис. 3. Моделирование относительного смещения судна на участке торможения

На основании данных расчетов и соотношений (6), (7) можно вычислить координаты точки начала торможения. Траектория, переводящая объект (1) из точки А (рис. 2) в данную точку определяется кривой Дубинса, гарантирующей минимальное время перехода. В таблице 1 приведен расчет точек торможения для стратегий управления, показанных на рис. 2.

Таблица 1

Координаты точек начала торможения при разных стратегиях управления

| N/N | Координаты точек | G <sub>1</sub> | G <sub>2</sub> | G <sub>3</sub> |
|-----|------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1.  | x, м             | 482.8          | 448.0          | 526.4          |
| 2.  | y, м             | 1317.2         | 1273.6         | 1351.9         |
| 3.  | σ, град          | 135            | 112.6          | 157.4          |

Таким образом, алгоритм построения оптимальной траектории перехода из точки А в точку В сводится к расчету для каждой точки  $G_i$  шести кривых Дубинса и выбора из них той, на реализацию которой затрачивается минимальное время.

Результаты расчета сведены в таблицу 2. Для рассматриваемого на рис. 2 примера оптимальной является траектория, проходящая через точку  $G_2$  в соответствии со стратегией LSR. Расчетное время составляет 476.94 секунды.

Таблица 2

Координаты контрольных точек оптимальной траектории, реализующей стратегию LSR при подходе с правого борта

| k | Точка          | x <sub>k</sub> , м | y <sub>k</sub> , м | σ <sub>k</sub> , рад | T <sub>k</sub> , сек |
|---|----------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| 0 | A              | 0                  | 0                  | 0                    | 36.3                 |
| 1 | P              | -34.44             | 182.36             | -0.37                | 93.4                 |
| 2 | Q              | -209.63            | 629.63             | -0.37                | 227.3                |
| 3 | G <sub>2</sub> | 448.02             | 1273.61            | 1.97                 | 120                  |
| 4 | B              | 800                | 1000               | 2.36                 | Σ = 477              |

Предложенный алгоритм легко обобщить для условия увеличения скорости в конечной точке. Легко видеть, что через интегрирование в обратном времени задача сводится к рассмотренной выше (с учетом замены путевых углов σ<sub>0</sub> и σ<sub>k</sub> на обратные). Оптимальная стратегия управления в данных условиях предложит разгон до требуемой скорости на начальном криволинейном участке.

Кроме того, данный алгоритм может быть адаптирован для случая, когда конечная точка не является фиксированной, что характерно для группового движения судов.

**Реализация стратегий управления для построения траектории в условиях группового движения судов**

Решение данной задачи требует исследования взаимного перемещения двух судов A и B, динамика движения каждого из которых описывается системой дифференциальных уравнений (1). При этом предполагается, что судно B движется прямолинейно с постоянной скоростью V<sub>b</sub> < V<sub>a</sub> и путевым углом σ<sub>b</sub>, и акватория допускает свободное маневрирование судна A. При данных условиях можно поставить следующие задачи:

1) Приведение судна A в кильватерный строй к судну B с заданным расстоянием (dk) от его кормовой части и согласованной с объектом B линейной скоростью движения.

2) Приведение судна A в строй фронта к судну B с заранее заданным расстоянием (db) от его правого или левого борта и согласованной с объектом B линейной скоростью движения.

В данных задачах конечная точка расчетной траектории судна A связана с положением судна B. Кроме того, при групповом движении важно учитывать геометрические размеры судов – уравнения (1) описывают движение центра масс судна.

Считая, что L<sub>A</sub>, B<sub>A</sub>, L<sub>B</sub>, B<sub>B</sub> – это длина и ширина каждого из судов, можно определить вспомогательные точки, соответствующие носовой

части (A') судна A, а также точки, соответствующие требуемым отклонением от центра тяжести судна B вдоль диаметральной плоскости (B'), от правого (B'') и левого (B''') бортов.

Тогда задача формализуется следующим образом: необходимо определить траекторию движения судна A из начальной точки A<sub>0</sub>(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, σ<sub>0</sub>, V<sub>A</sub>) за время t<sub>k</sub> в конечную точку A<sub>k</sub>(x<sub>k</sub>, y<sub>k</sub>, σ<sub>k</sub>, V<sub>B</sub>), в которой:

1) должны совпадать скорости и путевые углы судов A и B: V<sub>A</sub> = V<sub>B</sub> и σ<sub>A</sub> = σ<sub>B</sub> ;

2) нос судна A, т. е. точка A'<sub>k</sub> должен совпадать с точкой B'<sub>k</sub> (или B''<sub>k</sub>, или B'''<sub>k</sub>).

Пример такой траектории для перемещения в точку B'<sub>k</sub> показан на рис. 4.

Если центры масс судов совпадают с геометрическими центрами, координаты вспомогательных точек определяются по выражениям:

$$\begin{bmatrix} x_{A'_k} \\ y_{A'_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{A_k} \\ y_{A_k} \end{bmatrix} + L_A \begin{bmatrix} \sin \sigma_A \\ \cos \sigma_A \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} x_{B'_k} \\ y_{B'_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{B_k} \\ y_{B_k} \end{bmatrix} - \left( \frac{L_B}{2} + dk \right) \begin{bmatrix} \sin \sigma_B \\ \cos \sigma_B \end{bmatrix} \quad (12)$$

Также для упрощения предполагаем, что углом дрейфа при движении можно пренебречь, и путевой угол однозначно определяет и направление скорости, и ориентацию судна. Это справедливо при малых угловых скоростях поворота судна, что обеспечивают стратегии управления в конечных точках расчетных траекторий, поэтому подобное упрощение вполне допустимо.

Важно отметить, что t<sub>k</sub> – это время перемещения судна A из точки A<sub>0</sub> в точку A<sub>k</sub>, и также время перемещения судна B из точки B<sub>0</sub> в точку B<sub>k</sub> (см. рис. 4). Рассчитать это время можно, например, с помощью минимизации целевой функции

$$t_k = \min_{t \in T} \left\{ \left( t_{str}^{(A_0 \rightarrow A_k)} - t^{(B_0 \rightarrow B_k)} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

где t<sub>str</sub><sup>(A<sub>0</sub>→A<sub>k</sub>)</sup> – время перевода судна A в точку A<sub>k</sub> в соответствии с заранее определенной стратегией str, включающей одну из кривых Дубинса и один из способов торможения; t<sup>(B<sub>0</sub>→B<sub>k</sub>)</sup> – время перехода судна B в точку B<sub>k</sub>, а точки A<sub>k</sub> и B<sub>k</sub> соответствуют условию A'<sub>k</sub> = B'<sub>k</sub>, T – временной отрезок, на котором ищется решение. При групповом движении судов в ограниченной области целесообразно ограничить T интервалом в 1-2 часа.

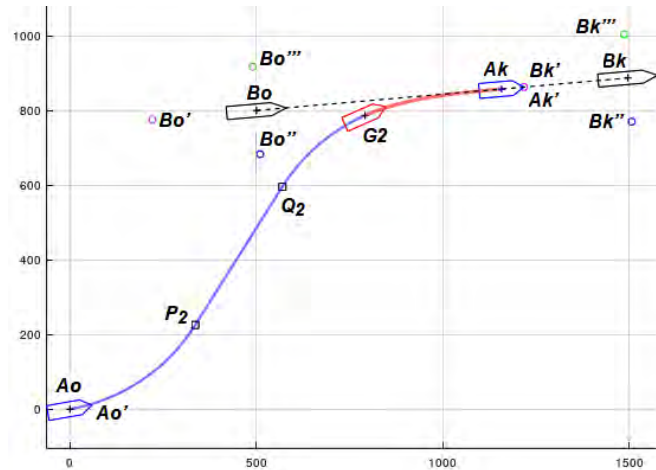


Рис. 4. Траектория движения судна А в кильватер к судну В

Таким образом, можно предложить следующий алгоритм расчета траектории:

1) Выполняется перебор рассмотренных выше стратегий управления с торможением на конечном участке ( $j=1:3$ );

2) Для каждой стратегии с торможением выполняется перебор шести простейших стратегий (2), определяющих кривые Дубинса ( $i=1:6$ ) на постоянной скорости;

3) Решением задачи (12) выполняется расчет минимального времени  $t_k^{(i,j)}$ ;

4) После окончания перебора выбирается минимальное время  $T_{min} = \min_{i,j} \{t_k^{(i,j)}\}$ ;

5) Проверяется условие существования решения  $T_{min} \in [0 \dots T]$ ;

6) Если условие не выполняется, значит маневр невозможен;

7) Если условие выполняется, то траектория рассчитывается в соответствии со стратегией ( $i,j$ ), при которой  $t_k^{(i,j)} = T_{min}$ .

Использование предложенной схемы позволяет провести расчет, сравнение и выбора оптимальной

по времени траектории перестроения судна А в кильватер объекта В. Очевидно, данный алгоритм позволяет реализовать и перестроение судна А на параллельный курс: для этого в задаче (12) необходимо искать время  $T$  из условия  $A'_k = B''_k$  или  $A'_k = B''_k$ .

Представленные на рис. 5 графики соответствуют перестроению судна А в кильватер судна В на расстояние в 200 м от его кормы, одновременно со снижением скорости с 10 до 6 узлов, и изменением путевого угла с  $80^\circ$  до  $85^\circ$ .

Анализ графиков показывает, что оптимальная по времени траектория соответствует стратегии управления LSR для всех маневров. Торможение начинается в точке  $G_2$ , находящейся по правому борту от судна В. Можно сделать вывод, что оптимальная стратегия в основном определяется начальным расположением судов друг относительно друга.

Таким образом, в работе предложен алгоритм расчета оптимальной по быстродействию траектории, который можно применять для планирования маршрута при движении судов в группе.

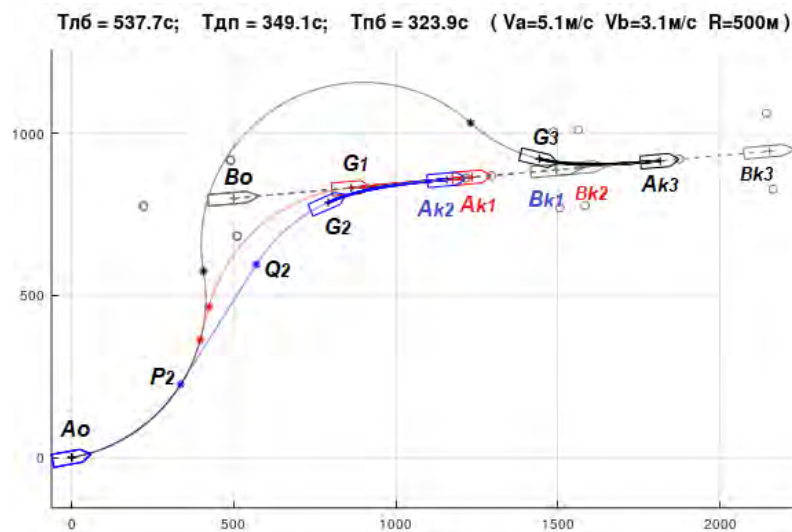


Рис. 5. Процесс перестроения судна А в кильватер судну В

### Заключение

В данной статье рассмотрена задача построения минимальной по времени траектории перехода судна в заданную точку с заданной скоростью, отличной от начальной. Подобные задачи обычно решаются через математический аппарат, называемый «машиной Дубинса», однако в классической постановке задачи скорость в процессе маневрирования остается постоянной. Именно требование к изменению скорости хода приводит к тому, что решение с помощью стандартных кривых Дубинса, представляющих собой последовательность линейных участков и дуг постоянного радиуса, оказывается не самым лучшим из-за необходимости реализации торможения на линейном участке траектории. Поэтому предложен нелинейный закон управления для изменения угловой скорости поворота, позволяющий осуществить выход в заданную точку по криволинейному участку одновременно с торможением. Соответственно, траектория движения судна при таком законе становится более сложной, возникает необходимость определения точки на дуге, в которой необходимо начать процесс

торможение. Вычисление точек искомой траектории реализуется через расчет интегральных тригонометрических функций. Показано, что подобные стратегии управления позволяют получить выигрыш по времени при торможении на конечном участке траектории, либо при разгоне – на начальном участке. На основе данной стратегии управления предложен алгоритм расчета траектории движения относительно другого судна, находящегося в движении, что позволяет автоматически сформировать караван либо линейное построение группы судов.

Предложенная методика имеет особую важность для предварительной прокладки маршрута безэкипажных судов, имеющих высокую степень автоматизации процессов управления движением. Особенно, если движение происходит в условиях ограниченной акватории, в составе группы судов. Можно также отметить полезность подобной функции и для типовых систем автоматизированной прокладки, входящих в современные электронно-картографические навигационно-информационные системы.

### Литература

1. Dubins L.E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents // American Journal of Mathematics. Vol. 79. 1957. P. 497–516.
2. Корнев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование траекторий движения безэкипажного судна. // Морские интеллектуальные технологии. 2021, Т. 1. № 4 (54). С. 163-170.
3. Вагизов М.Р., Хабаров С.П. Построение программных траекторий движения на базе решения задачи «Машина Дубинса». Информация и космос. 2021. № 3. С. 116-125.
4. 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.
5. 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. 167-179.
6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Постоянная\\_Эйлера\\_—\\_Маскерони](https://ru.wikipedia.org/wiki/Постоянная_Эйлера_—_Маскерони) (Дата обращения 07.02.2022 г.)

### References

1. Dubins L.E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents // American Journal of Mathematics. Vol. 79. 1957. P. 497–516.
2. Korenev A.C., Khabarov S.P., Shpektorov A.G. Formirovanie traektoriy dvizheniya bezekipazhnogo sudna. [A route calculation for unmanned vessel] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021, № 1-4 (54). pp. 163-170.
3. Vagizov M.R., Khabarov S.P. Postroenie programnykh traektoriy dvizheniya na baze resheniya zadachi "Mashina Dubinsa" [The construction of motion program trajectories based on the solution of the Dubins problem]. Informatsiya i kosmos. 2021. № 3. pp. 116-125
4. Khabarov S.P., Shilkina M.L. Geometricheskii podkhod k resheniyu zadachi dlya mashin Dubinsa pri formirovanii programnykh traektoriy dvizheniya [A geometric approach to solving the Dubins problem for the motion program trajectories construction]// Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. 2021., № 5 (21). pp. 653–663
5. Khabarov S.P., Shilkina M.L. Postroenie na baze zadachi mashiny Dubinsa opornykh traektoriy dvizheniya ob"ektov s uchetom postoyannykh vneshnikh vozdeystviy [The construction of vehicle reference trajectories on the basis of the Dubins problem with a factor of external disturbance action] // Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. 2022., № 1 (22).pp. 167-179.
6. [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s\\_constant](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s_constant) (Data obrashcheniya 07.02.2022 g.)



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

**Алексей Сергеевич Корнев**, 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, 54, building 5, Malyy Prospekt V.O., 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 им. 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, 5, Institutskii per., 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 15.01.2022; одобрена после рецензирования 22.02.2022, принята к публикации 28.02.2022.

The article was submitted 15.01.2022; approved after reviewing 22.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.

Научная статья

УДК 621.865.8

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.022>

## Способ калибровки промышленных роботов для судостроения с использованием модернизированного тросовытяжного датчика

Е.В. Ружицкая<sup>1</sup> [ruzhitskaya.ev@dvfu.ru](mailto:ruzhitskaya.ev@dvfu.ru), И.А. Баранчугов<sup>2</sup> [baranchugov\\_ia@dvfu.ru](mailto:baranchugov_ia@dvfu.ru),  
Б.С. Ноткин<sup>3</sup> [notkin@iacp.dvo.ru](mailto:notkin@iacp.dvo.ru), К.В. Змеу<sup>2</sup> [zmeu.kv@dvfu.ru](mailto:zmeu.kv@dvfu.ru)

<sup>1</sup>Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского,

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, <sup>3</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

**Аннотация.** Доля промышленных роботов в современных производствах непрерывно растет, в том числе в области судостроения. Такие многозвенные механизмы позволяют решать сложные технологические задачи, но их внедрение сдерживается из-за их ограниченной точности, уступающей точности традиционного станочного оборудования. Один из путей повышения точности промышленных роботов состоит в их калибровке, т.е. в уточнении математической модели для программной коррекции погрешностей изготовления и сборки, упругих и термических деформаций и прочих факторов, негативно влияющих на точность. Построение и параметризация модели робота требует измерения его фактического положения в различных позах. В настоящей работе исследуется возможность использования для этой цели тросовытяжного датчика, который позволяет регистрировать лишь частичную информацию о позе робота. Известны работы, где с помощью такого оборудования решались задачи кинематической калибровки. В настоящей работе исследуется возможность одновременной идентификации нежесткостей шарниров робота. Предложена конструкция измерительного модуля, позволяющего выполнять измерения расстояния до фланца во всем рабочем объеме. Описана математическая модель робота с упругими шарнирами. Средствами численного моделирования на примере манипуляционного робота KUKA KR10 R900 исследовано влияние начальных условий на качество идентификации параметров модели. Показана зависимость качества идентификации модели от числа поз робота. Проведенное исследование подтвердило возможность использования тросовытяжных датчиков для идентификации некинематических характеристик модели робота.

**Ключевые слова:** калибровка, верификация, манипулятор, оптимизация, нежесткий, идентификация, тросовытяжной датчик, упругий, кинематика

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Науки и Образования Российской Федерации [контракт 02.G25.31.0348].

**Для цитирования:** Ружицкая Е.В., Баранчугов И.А., Ноткин Б.С., Змеу К.В. Способ калибровки промышленных роботов для судостроения с использованием модернизированного тросовытяжного датчика, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 169—174

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.022>

## A method for calibrating industrial robots for shipbuilding using an upgraded pull-wire sensor

Elena V. Ruzhitskaya<sup>1</sup> [ruzhitskaya.ev@dvfu.ru](mailto:ruzhitskaya.ev@dvfu.ru), Il'ya A. Baranchugov<sup>2</sup> [baranchugov\\_ia@dvfu.ru](mailto:baranchugov_ia@dvfu.ru)  
Boris S. Notkin<sup>3</sup> [notkin@iacp.dvo.ru](mailto:notkin@iacp.dvo.ru), Konstantin V. Zmeu<sup>2</sup> [zmeu.kv@dvfu.ru](mailto:zmeu.kv@dvfu.ru)

<sup>1</sup>Admiral Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, Russian Federation, <sup>2</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, <sup>3</sup>Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** The share of industrial robots in modern industries, including shipbuilding, is constantly growing. Such multi-link mechanisms allow solving complex technological problems, although their implementation is hampered by their limited accuracy, inferior to the accuracy of traditional machine tool equipment. One of the patterns to improve the accuracy of industrial robots is their calibration, i.e. the refinement of the mathematical model for software correction of manufacturing and assembly errors, elastic and thermal deformations, and other factors that affect accuracy. Constructing and parameterizing a robot model requires measuring its actual position in various poses. The given article investigates the possibility of using a draw-wire sensor for this purpose, which allows registering only partial data on a robot's pose. There are relevant papers where the problems of kinematic calibration are solved with the help of such equipment. In this paper, the possibility of simultaneous identification of the non-rigidity of the robot's hinges is studied. The design of the measuring module is proposed, enabling the measurement of the distance to the flange in the entire working volume. A mathematical model of a robot with elastic hinges is outlined. By means of numerical modeling, the impact of initial conditions on the quality of identification of model parameters is analyzed on the example of a manipulation robot KUKA KR10 R900. The dependence of the model identification quality on the number of robot poses is demonstrated. The conducted research has confirmed the possibility of using draw-wire sensors to identify non-kinematic features of a robot.

**Keywords:** calibration, verification, manipulator, optimization, non-rigid, identification, draw wire sensor, elastic, kinematics

**Financial Support:** This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation [state contract 02.G25.31.0348].

**For citation:** Elena V. Ruzhitskaya, Il'ya A. Baranchugov, Boris S. Notkin, Konstantin V. Zmeu, A method for calibrating industrial robots for shipbuilding using an upgraded pull-wire sensor, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 169—174

## Введение

Манипуляционные роботы находят широкое применение в промышленности, в том числе в судостроении [1]. Способность программно перемещать инструмент по произвольным пространственным траекториям в значительном рабочем объеме делает такие механизмы применимыми для выполнения большинства технологических операций, в том числе тех, которые затруднительно осуществить с использованием традиционного станочного оборудования. Однако многозвенная последовательная структура, обеспечивающая таким механизмам технологическую гибкость, неизбежно ограничивает их механическую жесткость, что негативно влияет на точность позиционирования. В нагруженном состоянии ошибка позиционирования промышленного манипуляционного робота может достигать нескольких миллиметров [2], что недопустимо при высокоточном производстве.

Причинами ограниченной точности промышленных роботов являются погрешности изготовления и сборки, механические деформации шарниров, звеньев и передач, температурные деформации и т.п. [2].

Для повышения точности промышленных роботов применяют калибровки различных уровней. Калибровка первого уровня состоит в определении зависимости между сигналами, которые формируются датчиками, определяющими положение сочленений, и действительным положением. В нее включается калибровка кинематики приводов и механизмов датчиков. Второй уровень включает калибровку кинематической модели робота (калибровка геометрических размеров) [3]. Третий уровень («некинематической») калибровки включает настройку параметров, связанных с эффектами некинематического характера, такими как упругая деформация шарниров и звеньев робота, трение, люфты, нагрев, стабильность датчиков, деформации механических передач, влияние температуры окружающей среды и т.д. [4].

Исследованиям в области повышения точности промышленных манипуляторов посвящено множество работ [5-8], в которых авторы сходятся во мнении, что основным источником ошибки позиционирования манипуляционных механизмов являются отклонения их геометрических параметров. Однако при дополнительном учетывании негеометрических параметров удастся добиться более качественных результатов калибровки [9-12].

Цель калибровки состоит в определении реальных параметров робота для построения его математической модели, которая используется в контроллере робота для управления его движениями. Классическая процедура калибровки содержит четыре основных этапа: моделирование, измерение, идентификация и реализация [13]. Для

идентификации параметров модели необходимо провести измерения положения фланца в различных позах робота и определить такие параметры его модели, при которых модельные положения будут иметь наименьшие отклонения от экспериментальных. Как правило эта задача решается с использованием методов численной оптимизации [8].

Для измерения положения фланца робота могут использоваться различные приборы, например лазерные трекеры, тросовытяжные датчики, измерительные руки, датчики контактного действия, различные оптические измерительные системы и т.п. [14, 15].

В общем случае положение и ориентация фланца робота описываются шестью координатами (три координаты декартового положения и три угла ориентации). Однако на практике для целей калибровки достаточным может оказаться частичное измерение позы, содержащее три (например, только три декартовые координаты) или даже одну координату. Примером такого однокоординатного измерения служит система на базе тросовытяжного датчика, где для каждой позы робота регистрируется расстояние от фланца до точки размещения датчика. Неполнота измерения позы робота в таких системах компенсируется количеством поз робота, учитываемых при идентификации параметров. Например, в работе [13], где авторы для кинематической калибровки используют одномерное измерение позы с помощью тросовытяжного датчика, для идентификации 11 параметров выполнено 135 измерений фланца робота в различных позах.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности использования тросовытяжного датчика для калибровки третьего уровня, где кинематические параметры робота идентифицируются совместно с параметрами, определяющими нежесткости его шарниров.

## 1. Измерение положения робота

Для измерения положения фланца робота рассматривается тросовытяжной датчик WayCon серии SX80, имеющий длину троса 2000 мм и нелинейность 0,1% [17]. Внешний вид датчика представлен на рис. 1.

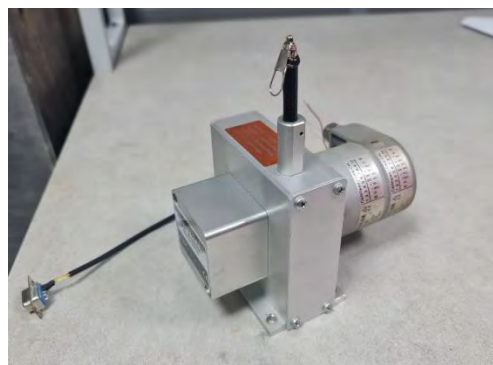


Рис. 1. Тросовытяжной датчик WayCon SX80

В условиях эксплуатации подобного оборудования отмечается запрет на тягу троса под углом, т.к. это ведет к избыточному натяжению троса из-за его трения о стенки выпускного канала, и, как следствие, к росту погрешностей измерения, а также к быстрому износу. Это требование сильно ограничивает вариативность поз робота.

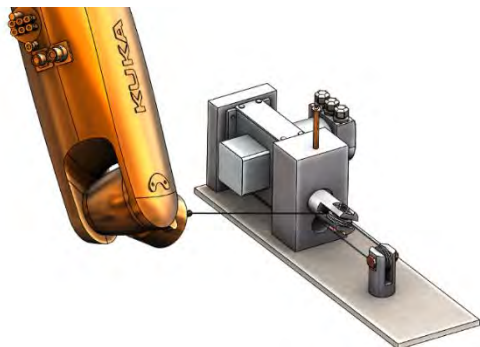


Рис. 2. Конструкция датчика расстояния

В настоящей работе предложена конструкция датчика расстояния, построенного на основе тросовытяжного датчика. Его внешний вид представлен на рис. 2.

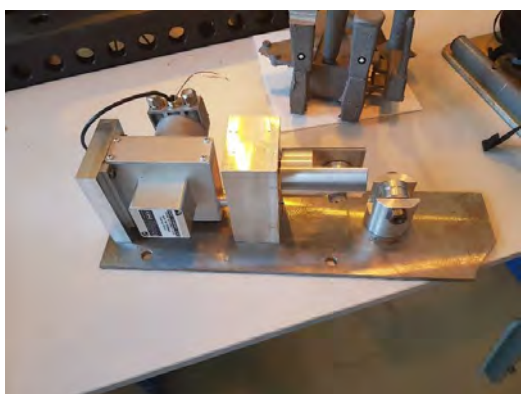


Рис. 3. Экспериментальный образец датчика расстояния

В предложенной конструкции трос выпускается через систему из двух роликов, где один имеет возможность поворота. Устройство спроектировано так, чтобы отсутствовал угол выхода троса из датчика и при этом длина троса от датчика до точки его схода с выпускного ролика была постоянной и не зависела от пространственного положения фланца робота. На рис. 3 представлен экспериментальный образец рассматриваемой конструкции датчика расстояния.



Рис. 4. Общий план схемы измерений

Предполагается, что для выполнения измерений датчик расстояния фиксируется неподвижно, при этом робот последовательно выводится в различные позы. На рис. 4 представлена поясняющая иллюстрация к схеме проведения измерений.

## 2. Математической модель робота с упругими шарнирами

Кинематика манипуляторов с классической 6-ти степенной конструкцией может быть описана представлением Денавита-Хартенберга [16]. В этом случае образуется 12 геометрических параметров, которые необходимо идентифицировать: 6 угловых и 6 линейных параметров.

Из негеометрических параметров наибольшее влияние на точность оказывает нежесткость шарниров и звеньев. Ошибка связанная с нежесткостью особенно сильно проявляется при нагружении робота. Для упрощения нежесткой модели не будем учитывать деформации звеньев. Исходя из конструкции робота видно, что деформации, которые возникают в звеньях, с некоторым приближением могут быть учтены деформацией в соответствующих шарнирах. Таким образом, данное упрощение позволит упростить модель без значительного расхождения между моделью и реальным роботом.

Деформация в шарнире представляет собой угловое отклонение от заданного положения под действием крутящего момента. Примем, что деформация в шарнире с достаточной точностью описывается законом Гука. Тогда угловое отклонение в  $i$ -ом шарнире:

$$\delta_i = \frac{M_i^{\Sigma}}{k_i} \quad (1)$$

где  $\delta_i$  – угловое отклонение в  $i$ -ом шарнире,  $M_i^{\Sigma}$  – суммарный крутящий момент на  $i$ -ом шарнире,  $k_i$  – коэффициент жесткости  $i$ -го шарнира.

Суммарный момент зависит от позы робота. Причем на фланец робота (шестой шарнир) действует только момент, вызванный полезной нагрузкой и массой самого шарнира. Тогда как на первый шарнир действуют моменты, вызванные массой всех звеньев, которые удерживает этот шарнир. Суммарный момент для  $i$ -го звена:

$$M_i^{\Sigma} = \sum_{j=i}^6 M_i^j + M_i^s, \quad (2)$$

где  $M_i^j$  – момент  $i$ -го шарнира, вызванный массой  $j$ -го звена,  $M_i^s$  – момент  $i$ -го шарнира, вызванный полезной нагрузкой.

Каждая составная часть суммарного момента может быть записана как векторное произведение силы на плечо:

$$M_i^j = m_j \cdot \bar{R}_i^j \times \bar{g}, \quad (3)$$

где  $\bar{R}_i^j$  – расстояние от оси вращения  $i$ -го шарнира до центра масс  $j$ -го звена,  $\bar{g}$  – вектор гравитации,  $m_j$  – масса  $j$ -го звена.

Для корректного расчета моментов необходимо знать массы и центры масс каждого звена и полезной нагрузки. Таким образом, в общем случае, чтобы учесть нежесткость в шарнирах необходимо определить 30 параметров:

- 6 масс звеньев;
- 18 (3x6) координат центров масс звеньев;
- 6 коэффициентов жесткости шарниров.

При калибровке робота помимо 12 геометрических параметров и 30 параметров, определяющие жесткость, необходимо дополнительно определить три параметра, характеризующих положение измерительной системы. Таким образом, для осуществления калибровки робота необходимо верифицировать модель, содержащую 45 параметров.

### 3. Идентификация параметров модели

Численный эксперимент проведен на примере манипуляционного робота KUKA KR10 R900. В модель внесены геометрические и угловые отклонения, имитирующие погрешности реального робота. Погрешность геометрических параметров до 1 мм и до 1,5 градусов. В каждый шарнир добавлен упругий элемент, обеспечивающий жесткость сочленения. Фиксация модельного положения фланца робота выполнена с помощью модели тросового датчика.

В работе рассматривается серия экспериментов по верификации параметров модели робота в различных условиях. Во всех экспериментах для верификации используются данные с модели тросового датчика с погрешностью 0,1% от длины вытянутого троса. В масштабе проводимых экспериментов эта погрешность в абсолютном выражении может достигать 2 мм. Для оценки точности верификации во всех экспериментах использовано тестовое множество, состоящее из 5 000 позиций робота, равномерно покрывающие его рабочую зону. Тестовое множество получено с помощью модели тросового датчика без искажений.

Для нахождения параметров модели используются оптимизационный алгоритм доверительных областей (Trust-region) [18]. Это алгоритм обладает высокой скоростью сходимости даже с большим количеством оптимизируемых параметров. Минимизируемой функцией является среднеквадратичная ошибка

$$J(\chi_1, \dots, \chi_{45}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \tilde{r}_i(\theta_i^{(1)}, \dots, \theta_i^{(6)}, \chi_1, \dots, \chi_{45}))^2}$$

между измеренной длиной троса  $r_i$  и его модельной длиной  $\tilde{r}_i$ , восстановленной по положению фланца для позы с шестью осевым координатами  $\theta_i^{(1)}, \dots, \theta_i^{(6)}$  и уточненными параметрами робота  $\chi_1, \dots, \chi_{45}$  (включая координаты положения датчика).

#### 3.1. Влияние начальных условий

Для исследования влияния начальных условий на качество и надежность идентификации параметров модели проведен следующий эксперимент. Начальные значения геометрических параметров выбраны в соответствии с паспортными данными робота (в его модель внесены отклонения). При этом значения негеометрических параметров взяты с начальным отклонением в диапазоне 5%, 10%, 20% и 40% от фактически используемых при моделировании робота. Для каждого диапазона начальных отклонений проведено по 100 экспериментов. Каждый эксперимент состоит в верификации параметров модели робота по результатам измерений его положения в 100 случайных позах при начальном условии, случайно

выбранном из исследуемого диапазона отклонений. Результаты представлены на рис. 5 в форме графика распределения среднеквадратичного отклонения на тестовом множестве.

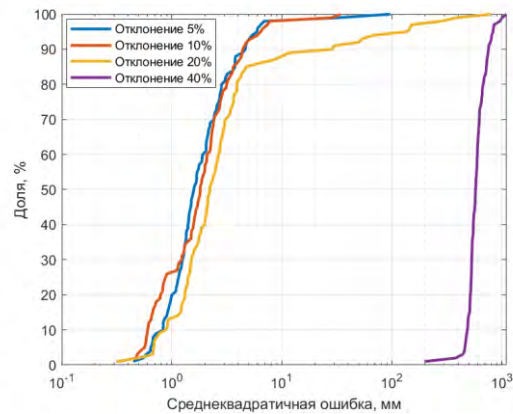


Рис. 5. Среднеквадратичная ошибка при различных начальных условиях

Из графиков видно, что отклонения от начальных условий до 20% не оказывают критического влияния на качество сходимости процедуры оптимизации. Однако при начальном отклонении 20% вероятность получить точный результат все же ниже, а в примерно 15% случаев и вовсе сходимости падает существенно. При увеличении начальных отклонений до 40% сходимости процедуры оптимизации снижается критически.

#### 3.2. Влияние количества поз робота

Рассмотрим влияние количества используемых поз робота на качество верификации модели. Для этого проведем четыре группы экспериментов, содержащие измерения 50, 100, 200 и 400 поз соответственно. Каждая группа содержит по 100 экспериментов со случайным выбором поз робота при отклонении начальных условий 10%. Результаты экспериментов представлены на рис. 6 в форме графика распределения среднеквадратичного отклонения на тестовом множестве.

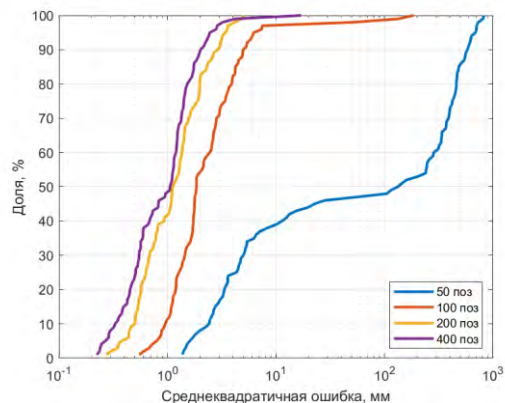


Рис. 6. Среднеквадратичная ошибка для различных количеств поз робота

Из графиков видно, что в целом, чем больше измерений, тем выше точность. Однако сходимости процедуры идентификации по 50 позам, когда количество измерений оказывается соизмеримым с

числом идентифицируемых параметров, следует признать неудовлетворительной. Идентификация выполняется по неполным (регистрируется одна координата вместо шести) и зашумлённым данным. В таких условиях точность и надёжность верификации модели возрастают по мере увеличения количества измерений. Это достигается благодаря более качественному и надёжному обобщению на большем объеме экспериментальных данных. При этом можно заметить, что при случайном выборе поз, погрешность верификации модели может отличаться на порядок.

#### Заключение

В работе изучена возможность применения тросовытяжного датчика для калибровки

промышленного робота с учетом нежесткости его шарниров. Предложена конструкция измерительного модуля. Описана математическая модель робота с упругими шарнирами, проведены численные эксперименты. Исследовано влияние начальных условий на качество идентификации параметров модели. Показана зависимость качества идентификации от числа поз робота. Результаты численных экспериментов показали возможность использования тросовытяжного датчика для калибровки промышленного робота с учетом нежесткости его шарниров. При этом отклонения начальных условий не должны превышать десятков процентов, а количество поз робота измеряться сотнями.

#### Литература

1. Ibrahim Cil; Fahri Arisoy; Hilal Kilinc; Ekrem Özgürbüz; Ahmet Yunus Cil; Erkan Uysal. 2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) // Challenges and Trends in Shipbuilding Industry: Digitization of SEDEF Shipyard in Turkey. Ankara, Turkey. 2021. pp. 799-804.
2. A. Nubiola and I. A. Bonev. Absolute robot calibration with a single telescoping // Precision Engineering. 2014.
3. Hayati S, Mirmirani M. Improving absolute accuracy of robot manipulators // J Robotic Systems. 1985. Vol. 2. No. 4. pp. 394-413.
4. Mooring BM, Pack TJ. Aspects of robot repeatability // Robotica. 1987. Vol. 5. pp. 223-230.
5. Driels MR, Swaze WE. Automated partial pose measurement system for manipulator calibration experiments // IEEE Trans Robotics Automat. 1994. Vol. 10. No. 4. pp. 430-440.
6. Roth ZS, Mooring BW, Ravani B. An overview of robot calibration // IEEE J Robotics. 1987. Vol. 3. No. 5. pp. 377-385.
7. A. Klimchik, Y. Wu, G. Abba, S. Garnier, B. Furet, A. Pashkevich. Robust algorithm for calibration of robotic manipulator model // 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control. 2013. Vol. 46. No. 9. pp. 808-812.
8. Alexandr Klimchik, Benoit Furet, Anatol Pashkevich. Algebraic technique for the stiffness model reduction in elastostatic // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Besacon, France. 2014.
9. Alexandr Klimchik, Stephane Caro, Benoit Furet, Anatol Pashkevich. Complete Stiffness Model for a Serial Robot // 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Vienna, Austria. 2014.
10. Roth, Z. S., B. Mooring and B. Ravani. An overview of robot calibration // Robotics and Automation. 1987. No. 3. pp. 377-385.
11. Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar. Robot Dynamics and Control. 2008. 60-67 pp.
12. Xin Deng; Lianzheng Ge; Ruifeng Li; Zhiheng Liu. 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC) // Research on the kinematic parameter calibration method of industrial robot based on LM and PF algorithm. Хэфэй, Китай. 2020.
13. Temesguen Messay, Raúl Ordóñez, Eric Marcil. Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and the irapplication to industrial robots // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. May 2015. Vol. 37. pp. 33-48.
14. J.M.S. Motta, G.C.deCarvalho, R.McMaster. Robot calibration using a 3d vision-based measurement system with a single camera // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. July 2014. Vol. 38. No. 3. pp. 472-480.
15. Hefele, J. & Brenner, C. Robot pose correction using photogrammetric tracking // Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology. Feb 2001. Vol. 41. No. 89. pp. 170-178.
16. Alexandr Klimchik, Benoit Furet, Stéphane Caro, Stéphane Caro. Identification of the manipulator stiffness model parameters in // Mechanism and Machine Theory, Vol. 90, August 2015. pp. 1-22.
17. Grigore Gogu, Inocentiu Maniu, Erwin-Christian Lovasz, Jean-Christophe Fauroux, Valentin Ciupe. Optimal Selection of Measurement Configurations for Stiffness Model Calibration of Anthropomorphic Manipulators // Applied Mechanics and Materials, Vol. 162, March 2012. pp. 161-170.
18. Draw Wire Sensor SX80 Data Sheet // WayCon Positionsmesstechnik GmbH. 2020. URL: <https://www.waycon.biz/fileadmin/draw-wire-sensors/Draw-Wire-Sensor-SX80.pdf> (дата обращения: 12 Ноября, 2021).

#### References

1. Ibrahim Cil; Fahri Arisoy; Hilal Kilinc; Ekrem Özgürbüz; Ahmet Yunus Cil; Erkan Uysal. 2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT); Challenges and Trends in Shipbuilding Industry: Digitization of SEDEF Shipyard in Turkey. Ankara, Turkey. 2021. pp. 799-804.
2. Nubiola and I. A. Bonev, "Absolute robot calibration with a single telescoping," Precision Engineering, 2014.
3. Hayati S, Mirmirani M., "Improving absolute accuracy of robot manipulators," J Robotic Systems, vol. 2, no. 4, pp. 394-413, 1985.
4. Mooring BM, Pack TJ, "Aspects of robot repeatability," Robotica, vol. 5, pp. 223-230, 1987.

5. Driels MR, Swaze WE, "Automated partial pose measurement system for manipulator calibration experiments," IEEE Trans Robotics Automat, vol. 10, no. 4, pp. 430-440, 1994.
6. Roth ZS, Mooring BW, Ravani B., "An overview of robot calibration," IEEE J Robotics, vol. 3, no. 5, pp. 377-385, 1987.
7. Klimchik, Y. Wu, G. Abba, S. Garnier, B. Furet, A. Pashkevich, "Robust algorithm for calibration of robotic manipulator model," 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, vol. 46, no. 9, pp. 808-812, 2013.
8. Alexandr Klimchik, Benoit Furet, Anatol Pashkevich, "Algebraic technique for the stiffness model reduction in elastostatic," in IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Besacon, France, 2014.
9. Alexandr Klimchik, Stephane Caro, Benoit Furet, Anatol Pashkevich, "Complete Stiffness Model for a Serial Robot," in 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Vienna, Austria, 2014.
10. Roth, Z. S., B. Mooring and B. Ravani, "An overview of robot calibration," Robotics and Automation, no. 3, pp. 377-385, 1987.
11. Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot Dynamics and Control, 2008, pp. 60-67.
12. Xin Deng ; Lianzheng Ge ; Ruifeng Li ; Zhiheng Liu, "2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)," in Research on the kinematic parameter calibration method of industrial robot based on LM and PF algorithm, China, 2020.
13. Temesguen Messay, Raúl Ordóñez, Eric Marcil, "Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and the irapplication to industrial robots," Robotic sand Computer-Integrated Manufacturing, vol. 37, pp. 33-48, May 2015.
14. J.M.S. Motta, G.C.deCarvalho, R.McMaster, "Robot calibration using a 3d vision-based measurement system with a single camera," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 38, no. 3, pp. 472-480, July 2014.
15. Hefele, J. & Brenner, C., "Robot pose correction using photogrammetric tracking," Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology, vol. 41, no. 89, pp. 170-178, Feb 2001.
16. Alexandr Klimchik, Benoit Furet, Stéphane Caro, Stéphane Caro, "Identification of the manipulator stiffness model parameters in," Mechanism and Machine Theory, vol. 90, pp. 1-22, August 2015.
17. Grigore Gogu, Inocentiu Maniu, Erwin-Christian Lovasz, Jean-Christophe Fauroux, Valentin Ciupe, "Optimal Selection of Measurement Configurations for Stiffness Model Calibration of Anthropomorphic Manipulators," Applied Mechanics and Materials, vol. 162, pp. 161-170, March 2012.
18. "Draw Wire Sensor SX80 Data Sheet," 2020. [Online]. Available: <https://www.waycon.biz/fileadmin/draw-wire-sensors/Draw-Wire-Sensor-SX80.pdf>. [Accessed 12 November 2021].

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

**Елена Васильевна Ружицкая**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии материалов, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: iterra@mail.ru

**Elena V. Ruzhitskaya**, Ph.D. (Eng), Assistant professor, Assistant professor of the Department of Materials Technology, Admiral Nevelskoy Maritime State University, Verkhneportovaya, 50a, Vladivostok, 690059, Russian Federation, e-mail: iterra@mail.ru

**Илья Александрович Баранчугов**, аспирант департамента компьютерно-интегрированных производственных систем, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: baranchugov\_ia@dvvfu.ru

**Il'ya A. Baranchugov**, Graduate student, Graduate student of the Department of Computer-Integrated Industrial Systems, Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Russky Island, Vladivostok 690922, Russian Federation, e-mail: baranchugov\_ia@dvvfu.ru

**Борис Сергеевич Ноткин**, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории прецизионных оптических методов измерений, Институт автоматизации и процессов управления, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: notkin@iacp.dvo.ru

**Boris S. Notkin**, Ph.D. (Eng), Researcher of Laboratory of high-precision optical methods of measurement, Institute of Automation and Control Processes, Radio, 5, Vladivostok 690041, Russian Federation, e-mail: notkin@iacp.dvo.ru

**Константин Витальевич Змеу**, кандидат технических наук, директор департамента компьютерно-интегрированных производственных систем, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: zmeu.kv@dvvfu.ru

**Konstantin V. Zmeu**, Ph.D. (Eng), Director of the Department of Computer-Integrated Industrial Systems, Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Russky Island, Vladivostok 690922, Russian Federation, e-mail: zmeu.kv@dvvfu.ru

Статья поступила в редакцию 12.01.2022; одобрена после рецензирования 14.02.2022, принята к публикации 25.02.2022.

The article was submitted 12.01.2022; approved after reviewing 14.02.2022; accepted for publication 25.02.2022.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.023>

## Алгоритмы процесса управления балластной системой при промывке балластных танков

А.Л. Чемодаков<sup>1</sup> chemodakov@yandex.ru

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

**Аннотация.** Значительный объем морских перевозок наливных грузов создал проблему переноса опасных и патогенных водных организмов с судовым водяным балластом. В настоящее время для ее решения применяются различные технологические операции. Наиболее распространенной является процедура замены балласта. Дополнительно, для повышения эффективности данной операции танкеры стали оборудоваться системами промывки балластных танков. Для разработки системы автоматического управления такой системой необходимо соответствующее алгоритмическое обеспечение. В работе представлен алгоритм управления процессом промывки танка изолированного балласта, являющегося частью алгоритма управления балластными операциями. Он предусматривает подготовительные процедуры, синхронный и асинхронный режим работы промывочных сопел, процедуры окончания промывки. При синхронном режиме все сопла работают одновременно, независимо от уровня жидкости. При асинхронном режиме группы промывочных сопел включаются и отключаются в зависимости от уровня в балластном танке. Рассматриваемый алгоритм может быть использован при разработке программного обеспечения системы управления балластной системой танкера.

**Ключевые слова:** танкер, балластная система, балластные операции, алгоритм управления, система управления, балластный танк, промывка танков, замещение балласта.

**Для цитирования:** Чемодаков А.Л., Алгоритмы управления балластной системой при промывке балластных танков, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 175—179

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.023>

## Control algorithms for ballast tanks flushing process

Andrei L. Chemodakov<sup>1</sup> chemodakov@yandex.ru,

<sup>1</sup>Maritime state University, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** A significant volume of sea transportation of liquid cargoes has created the problem of transferring dangerous and pathogenic aquatic organisms with ship's ballast water. Currently, various technological operations are used to solve it. The most common is the ballast replacement procedure. Additionally, to increase the efficiency of this operation, tankers are equipped with ballast tank flushing systems. To develop an automatic control system for these systems, appropriate algorithmic support is needed. The paper presents an algorithm for controlling the process of washing an isolated ballast tank flushing, which is part of the ballast operations control algorithm. It provides for preparatory procedures, synchronous and asynchronous operation of the flushing nozzles, and flushing finish procedures. In synchronous mode, all nozzles work simultaneously, regardless of the liquid level. In asynchronous mode, groups of flushing nozzles are switched on and off depending on the level in the ballast tank. The algorithm under consideration can be used in the development of software for the control system of the tanker ballast system.

**Key words:** tanker, ballast system, ballast tank, control algorithm, control system, tank flushing, ballast exchange.

**For citation:** Andrei L. Chemodakov, Control algorithms for ballast tanks flushing process, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 175—179

### Введение

Возрастающее международное значение решения проблемы переноса морских организмов с водяным балластом не могло не привести к созданию определенных документов на уровне ООН и ИМО.

Для частичного решения этой проблемы в ИМО разработано "Руководство по предотвращению переноса опасных и патогенных водных организмов с судовым водяным балластом". Согласно этому документу основным методом устранения проблемы водяного балласта является смена балласта, которая может выполняться двумя способами; замещением (последовательный способ) и прокачкой. Однако их применение не позволяет решить проблему полностью.

Набор корпуса, располагающийся в балластных танках, создает застойные зоны, в которых накапливаются морские организмы, ил. В настоящее время, для решения этой проблемы, балластные танки начали оборудовать промывочной системой. Соответственно, для автоматического управления такой системой необходимо соответствующее алгоритмическое обеспечение. В статье предлагается алгоритм управления непосредственно балластной системой и ее подсистемой, реализующей функцию промывки цистерн.



### Укрупненный алгоритм управления балластной системой

В состав системы входят промывочные сопла, располагаемые в балластных танках, насосы, подающие промывочную воду на сопла, запорные клапаны с дистанционным управлением для включения/выключения сопел. В каждой цистерне сопла разбиты на группы, устанавливаемые над бортовыми стрингерами. На рис. 1. показан пример такой системы в бортовом балластном танке.

В бортовом танке расположены три горизонтальных стрингера (Ст1, Ст2, Ст3), над которыми установлены группы промывочных сопел, включаемые клапанами К1, К2, К3. Промывочная вода в группу подается специальным насосом ПН. Включение/отключение сопел происходит по достижению уровнем жидкости заданных значений (L1н, L2н, L3н – уровни включения сопел 1, 2, 3 соответственно, L1к, L2к, L3к – уровни выключения сопел).

Для автоматического управления балластными операциями с участием промывочной системы требуются изменения в алгоритме управления. Рассмотрим укрупненный алгоритм управления балластной системой, предусматривающий процедуру замещения балласта (Рис. 2).

1. Выбор вида балластных операций. По признаку, введенному оператором, определяется вид балластных операций (БО): обычный прием/слив балласта или замещение балласта.

2. Подготовка запорной арматуры. В соответствии с технологией проведения заданной операции запорная арматура приводится в необходимое положение.

3. Пуск балластного насоса (БН). Выполняется процедура пуска и ввода в рабочий режим БН. Если прием/слив балласта осуществляется самотеком, то процедура может не выполняться или выполняться с временной задержкой, определяемой по заданному признаку (например, по достижению определенного уровня в танке).

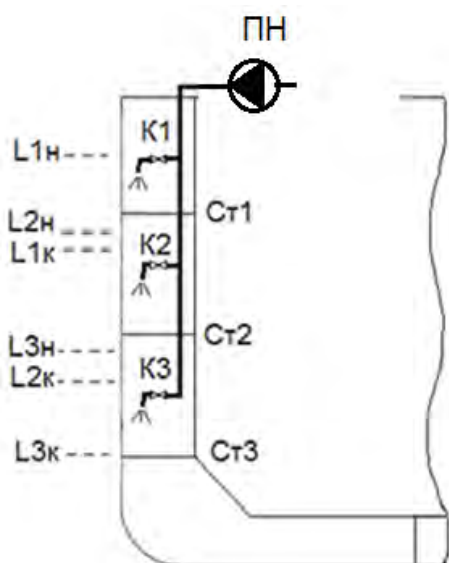


Рис. 1. Элементы промывочной системы бортового балластного танка

1. Проверяется признак выполнения операции промывки БТ. Если операция промывки задана следующим выполняется блок 5. В противном случае – блок 6.

2. Промывка БТ. Осуществляется подготовка, пуск промывочной системы, выполнение технологической последовательности промывки балластного танка (БТ), остановка процедуры по заданному признаку (уровню в цистерне, времени выполнения, аварийному сигналу и др.).

3. Контроль параметров. Производится контроль параметров процесса, обеспечивается заданная технология операции. По заданным признакам определяется конец операции.



Рис. 2. Алгоритм управления балластными операциями

4. Подготовка запорной арматуры. Запорная арматура приводится в положение, определяемое технологией выполнения операции замещения балласта.

5. Пуск балластного насоса. Выполняется процедура пуска и ввода в рабочий режим БН.

6. Промывка БТ. Осуществляется подготовка, пуск промывочной системы, выполнение технологической последовательности промывки БТ, используемых для замещения балласта, остановка процедуры по определенному признаку (уровню в цистерне, времени выполнения, аварийному сигналу и т. д.).

7. Контроль параметров. Производится контроль параметров процесса, обеспечивается заданная технология операции. По заданным признакам определяется конец операции.

8. Остановка БН. Выполняются процедуры вывода из режима и остановки БН.

9. Подготовка запорной арматуры. Запорная арматура приводится в соответствующее положение, определяемое технологией операции.

Каждый блок алгоритма представляет собой технологическую процедуру, состоящую из определенных операций.

### Алгоритм управления процессом промывки цистерны

Рассмотрим более детально процедуры алгоритма управления промывкой балластного танка (Рис. 3).

1. Ожидание команды начать промывку. Команда вводится оператором или поступает от системы управления балластными операциями.

2. Задается режим промывки. Алгоритм предусматривает два режима работы сопел: синхронный и асинхронный. При синхронном режиме сопла всех групп работают одновременно независимо от уровня балластной воды. При асинхронном режиме группы сопел включаются и выключаются последовательно, по мере снижения уровня, причем последующая группа включается до выключения верхней группы и некоторое время (несколько минут) они работают вместе.

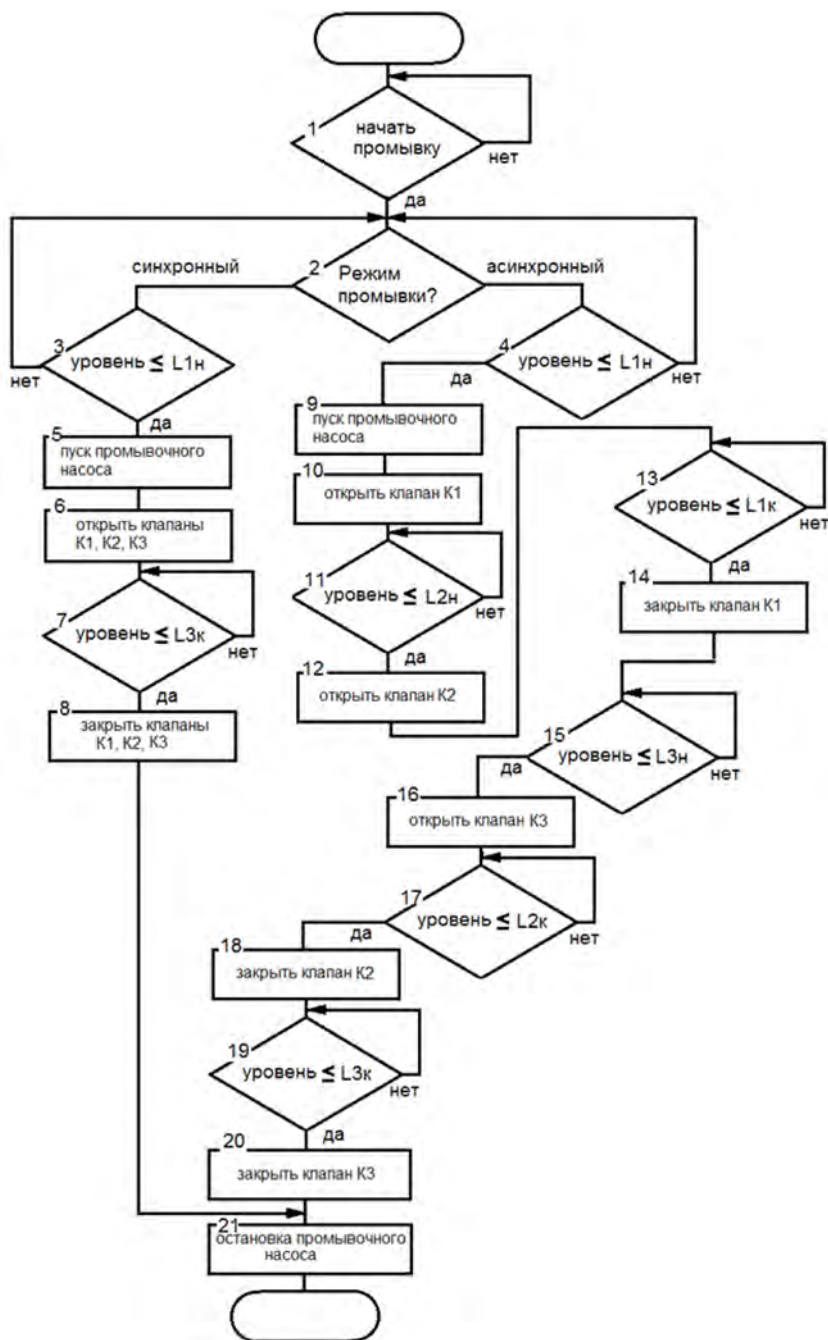


Рис. 3 Алгоритм управления процедурой промывки

3. Вид режима задается оператором. При задании синхронного режима далее выполняются

блоки 3,5,6 – 8. При асинхронном режиме – блоки 4, 9 – 20.

4. Уровень в танке сравнивается со значением уровня включения промывочного насоса и первой группы сопел – L1н. Если уровень достиг этого значения, далее выполняется блок 5. В противном случае продолжается контроль уровня.

5. Уровень в танке сравнивается со значением уровня включения промывочного насоса и первой группы сопел – L1н. Если уровень достиг этого значения, далее выполняется блок 9. В противном случае продолжается контроль уровня.

6. Выполняется процедура пуска промывочного насоса. Если система промывки питается от системы водяного пожаротушения, то открывается сообщающий их клапан. В этом случае пожарный насос должен быть запущен.

7. Открываются клапаны всех групп промывочных сопел.

8. Уровень воды сравнивается со значением уровня отключения третьей группы сопел – L3к. По достижении этого значения выполняется блок 8. Если уровень не достиг этого значения, продолжается контроль уровня и выполняется промывка всеми группами сопел.

9. Закрываются клапаны всех групп. Промывка закончена.

10. Выполняется процедура пуска промывочного насоса. Если система промывки питается от системы водяного пожаротушения, то открывается сообщающий их клапан. В этом случае пожарный насос должен быть запущен.

11. Открывается клапан первой (верхней) группы сопел – K1.

12. Уровень в танке сравнивается со значением уровня включения второй группы сопел – L2н. Если уровень достиг этого значения, далее выполняется блок 12. В противном случае продолжается контроль уровня.

13. Открывается клапан K2. Начинает работать вторая группа сопел

14. Уровень в танке сравнивается со значением уровня выключения первой группы сопел – L1к. Если уровень достиг этого значения, далее выполняется блок 14. В противном случае продолжается контроль уровня.

15. Закрывается клапан второй группы сопел – K1.

16. Уровень в танке сравнивается со значением уровня включения третьей группы сопел – L3н. Если уровень достиг этого значения, далее выполняется блок 16. В противном случае продолжается контроль уровня.

17. Открывается клапан K3, начинает работать третья группа сопел.

18. Уровень в танке сравнивается со значением уровня выключения второй группы сопел – L2к. Если уровень достиг этого значения, далее выполняется блок 18. В противном случае продолжается контроль уровня.

19. Закрывается клапан третьей группы сопел – K3.

20. Выполняется процедура остановки промывочного насоса или закрывается клапан сообщения с пожарной системой.

В представленном алгоритме, промывку при асинхронном режиме состоит из трех этапов, по числу бортовых стрингеров. При большем их количестве, соответственно увеличивается число этапов, групп промывочных сопел и их управляющих клапанов.

#### Заключение

Представленные алгоритмы может быть использован при разработке программного обеспечения системы управления балластной системой танкера, реализующей функцию промывки цистерн при их осушении, а также тренажеров, моделирующих энергетическую установку танкера и его специальные системы.

#### Литература

1. Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года и кодекс по одобрению систем управления балластными водами (Кодекс СУБВ), СПб., изд. ЦНИИМФ, 2018, 254 с.
2. Чемодаков А. Л. Алгоритмы управления специальными системами танкеров //Аспекты оперативного управления в технических системах: сб. научн. тр. Саратов.: Издательство "Альтернатива", 2017.С. 9-12.
3. Z. Qi, I. Eames, A. Greig. Flushing ballast tanks.: Ocean Engineering, 89, 2014, pp. 157-172.
4. N. Anwar, L. Churcher. Ballast Water Management, Understanding the regulations and the treatment technologies available, 11th Edition, Livingston, Witherby Publishing Group Ltd, 2020, 466 p.
5. Emerging Ballast Water Management Systems.: Proceedings of the IMO-WMU Research and Development Forum, Malmö. WMU Publication, 2010. 322 p.

#### References

1. Mezhdunarodnaya konventsiya o kontrole ballastnykh vod i osadkov i upravlenie imi 2004 i kodeks po odobreniyu sistem upravleniya ballastnymi vodami (Kodeks SUBV) [International convention for the control and management of ships' ballast water and sediments, 2004 and Code for Approval of Ballast Water Management Systems (BWMS Code)],SPb., izd. ChNIIMF, 2018, 254 s.
2. Chemodakov A. L. Algoritmy upravleniya spetsial'nymi sistemami tankerov [Tanker special system control algorithms].: Aspekty operativnogo upravleniya v tehnikeskikh sistemakh [Aspects of operational control in technical systems], sb. nauch. tr., Saratov, izd. Alternativa, 2017, ss. 9-12.
3. Z. Qi, I. Eames, A. Greig. Flushing ballast tanks.: Ocean Engineering, 89, 2014, pp. 157-172.
4. N. Anwar, L. Churcher. Ballast Water Management, Understanding the regulations and the treatment technologies available, 11th Edition, Livingston, Witherby Publishing Group Ltd, 2020, 466 p.
5. Emerging Ballast Water Management Systems.: Proceedings of the IMO-WMU Research and Development Forum, Malmö. WMU Publication, 2010.,. 322 p.

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

**Андрей Леонидович Чемодаков**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации автоматизированных судовых энергетических установок, Морской государственной университет им. адмирала Г. И. Невельского, , 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: chemodakov@yandex.ru

**Andreyi L. Chemodakov**, Ph. D. (Eng), assistant professor, Head of the Department of ships power plant automation, Maritime State University, 50a, Verhneportovay st., Vladivostok, 690059, Russian Federation, e-mail: chemodakov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 11.11.2021; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 04.03.2022.

The article was submitted 11.11.2021; approved after reviewing 15.02.2022, accepted for publication 04.03.2022.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В СУДОСТРОЕНИИ INTELLIGENT SYSTEMS IN SHIPBUILDING

Научная статья

УДК 656.61.052: 629.123: 004.021

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.024>

### Модель нечёткой системы поддержки принятия решений в задачах управления скоростью судна при следовании судна по оптимальному пути

В.И. Филатов<sup>1</sup> Filatov\_viktor1994@mail.ru

<sup>1</sup>Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск

**Аннотация.** Для выработки приближённого решения в классе задач о поиске оптимального пути судна, могут быть применены методы динамического программирования и дискретной оптимизации на графах. С точки зрения судовождения, такие решения представляют собой стратегию «менеджмента курсов». Реальная стратегия плавания судна по линии заданного пути (ЛЗП) включает в себя также управление скоростью судна. В настоящее время не существует единого подхода к решению этой задачи. В данной статье предлагается рассмотреть модель системы поддержки принятия решений (СППР), которая позволяет выработать решение об изменении текущего режима эксплуатации главной судовой энергетической установки (ГСЭУ), а именно изменить число RPM (оборотов в минуту).

В данной статье использован математический аппарат нечётких функций и нечёткой логики при построении модели СППР. В случае выработки решения об изменении RPM, на основании мониторинга текущего состояния судна, возникает ещё одна проблема – при изменении скорости судна оптимальный путь, найденный на этапе планирования перехода не является больше таковым, в связи с этим необходимо выработать решение о целесообразности его перестроения. Методология решения этих проблем представлена в данной работе.

**Ключевые слова:** Система поддержки принятия решения в судовождении, СППР, нечёткая логика, управление скоростью, оптимизация пути судна, мониторинг состояния судна, при плавании судна по ЛЗП.

**Для цитирования:** Филатов В.И. Модель нечёткой системы поддержки принятия решений в задачах управления скоростью судна при следовании судна по оптимальному пути, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 180—186

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.024>

### Fuzzy model of decision support system for ship's speed management in case of ship is following the optimal predicted path

Viktor I. Filatov<sup>1</sup> Filatov\_viktor1994@mail.ru

<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** The dynamic Programming and discrete Optimization based on Graphs Theory could be used in order to solve the problem of Ship's Path Optimization. In terms of Ship's handling and maneuvering such results should be interpreted as "Course Management". Actual Strategy of Ship's Sailing on Targeted Line of Sailing includes Ship's Speed Management. There is no universal solution of this task. In this article described Decision Support System (DSS), which can generate the decision to change the mode exploitation of Main Engine, for instance: change its RPM. The mathematical model of Fuzzy Functions and Fuzzy Sets had been used to create such DSS ME. In case of determination the decision of RPM alteration the previous Path should not be used as Targeted due to prevailing condition, thus it is problem to be solved also. Thus, The Optimization of the Path should be re-calculated. The methodology of abovementioned problems is stated in this article.

**Key words:** Decision Support System for Navigation, DSS, Fuzzy Logic, Speed Management, Ship's Voyage Optimization, Monitoring of Ship's Condition when Sailing on Targeted Path.

**For citation:** Viktor I. Filatov, Fuzzy model of decision support system for ship's speed management in case of ship is following the optimal predicted path, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 180—186

#### Введение

Задачи о поиске оптимального пути на графах методом динамического программирования имеют серьёзную практическую значимость и множество способов программной реализации, как для задач повышения безопасности мореплавания, так и для коммерческой оптимальности рейса. В условиях современного фрахтового рынка задачи безопасности мореплавания, эффективности рейса,

коммерческой оптимальности, экологической безопасности необходимо рассматривать исключительно совместно.

Методы построения вероятностного графа с заданной необходимой детализацией в зависимости от погодных условий, периода прогноза погоды, периода плавания и других параметров, дают возможность выбора оптимального направления движения, что является «менеджментом курсов плавания». Очевидным недостатком такого подхода

является отсутствие возможности выбора оптимальной скорости судна – «менеджмента скорости». Существует несколько концепций менеджмента скорости, среди которых наиболее значимыми являются:

- “Slow steaming” – метод эксплуатации ГСЭУ на пониженных оборотах для понижения расхода топлива и выбросов вредных газов в атмосферу, преимущественно применяемый на контейнеровозах. Недостатком этого метода является уменьшение ресурса ГСЭУ в связи её эксплуатацией за пределами наиболее эффективного диапазона об/мин.;
- “Virtual Arrival” – метод управления скоростью группы судов оператором, целью которого является избежание простоя или задержки каждого судна в зависимости от текущего и прогнозируемого состояния других судов, входящих в множество объектов управления. Недостатком данного метода является субъективность оператора и отсутствие единого алгоритма управления, которое не учитывает особенности судов, если они являются судами разного типа, конструкции, и оборудованы разными ГСЭУ.

В данной работе предлагается разработать экспертную систему поддержки принятия решений по управлению ГСЭУ, которая, в некоторой степени, может имитировать поведение судоводителя и рассчитать наиболее приемлемый режим работы ГСЭУ. Более того, новое управляющее воздействие должно оказывать влияние на оптимальность всего рейса, и соответственно должна быть проанализирована целесообразность изменения всей стратегии судна, при плавании по ЛЗП.

Для построения описанной системы управления, в качестве математического аппарата предлагается использовать теорию нечёткого управления и теорию нечётких функций. Подробное теоретическое изложение можно найти в источниках [2, 4, 5].

### 1. Этапы формирования СППР ГСЭУ

При построении нечёткой СППР управления скоростью судна [6] необходимо выделить следующие этапы:

- Определение основных параметров оптимальности при следовании судна ЛЗП, которая получена на начальном этапе поиска оптимального пути судна;
- Определение качественных показателей состояний оптимальности режима работы ГСЭУ во время плавания судна;
- Задача минимизация неопределённости в задачах о следовании по ЛЗП;
- Нормирование данных входа для фаззификации сигнала;
- Дефаззификация данных для задания управляющего воздействия и их последующее возвращение значения;
- Формирование базы правил нечёткого вывода на основе экспертной базы знаний и экспертном опыте;
- Получение на выходе численного значения, задающего режим работы ГД и решения о перестроении всей стратегии плавания судна по ЛЗП.

Для согласования работы системы нечёткого вывода используется метод нормирования входного и выходного сигнала по методу «Минмакс»:

$$s_i = \frac{U_i - \min(U_i)}{\max(U_i) - \min(U_i)}, i = \overline{1, N} \quad (1)$$

где  $f: s_i \rightarrow [0, 1]$  – нормированное значение состояния входного сигнала,  $U_i$  – текущее значение параметра,  $\min(U_i)$  – минимальное значение элемента в полном векторе,  $\max(U_i)$  – максимальное значение элемента в полном векторе, соответственно.

При получении нормированного управляющего воздействия выполняется обратная процедура по возвращению численного значения выработанного решения.

Для создания СППР, решения которой могут быть похожи на решения, принятые человеком, необходимо описать саму систему регулирования, которой в данной работе является электронный цифровой блок управления главного двигателя ГД (M/E Electronic Control System). Математическая модель управления динамической системой ГД может быть описана с помощью состояний  $S_i$ , выраженными дифференциальными уравнениями в частных производных до второго порядка:

$$S_i = [s_i \ s_i' \ s_i''] = \left[ s_i \ \frac{ds_i}{dt} \ \frac{d^2s_i}{dt^2} \right] \quad (2)$$

где:  $s_i$  – численное значение параметра,  $s_i'$  – частная производная первого порядка,  $s_i''$  – частная производная второго порядка.

Такое представление вектора состояния позволяет отразить динамику повеления функций параметров, мониторинг которых влияет на поведение системы в целом.

Для формирования входного сигнала, уравнение (2) необходимо привести к уравнению статики. Для этого необходимо, чтоб  $ds_i/dt \rightarrow 0, d^2s_i/dt^2 \rightarrow 0$ . Такой срез на временной функции позволит определить текущее статическое состояние системы.

На рисунке 1 приведена блок-схема системы СППР ГД, которая состоит из трёх блоков: блока нечёткой оценки точности прогноза погоды, блока нечёткого управления RPM ГД и блока чёткой подсистемы перестроения пути, которая вырабатывает решение о полном перестроении графа в области поиска оптимальной траектории плавания (ОПОТП). Детальное описание работы каждого отдельного блока приведено в статье далее.

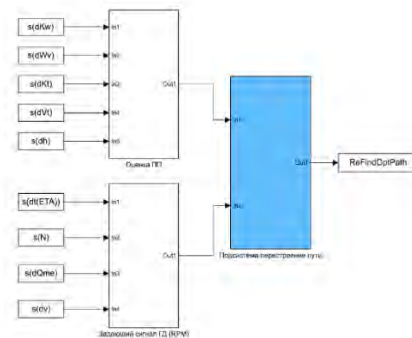


Рис. 1. Блок-схема СППР ГД при следовании судна по ЛЗП

## 2. Оценка эффективности морского перехода танкера класса «Афромакс»

Качественные числовые характеристики параметров работы основаны на использовании базы знаний, которой в данном случае является электронный журнал автоматической регистрации данных режимов работы ГД (M/E Electronic Control System Log) и журнал записи данных эксплуатации ГД (Abstract Log).

Для численного моделирования использовались натурные данные эксплуатации ГД «MAN BW EGB Part load tuning» с возможностью программной «тонкой» регулировки количества RPM (об/ мин.) На рисунке 2 представлен временной ряд параметра  $Qme_\phi = Qme_i \times 24$ , (т/сут) и его ряд частных производных первого и второго порядка соответственно после выполнения линеаризации ряда и приведению его в виду временной функции.

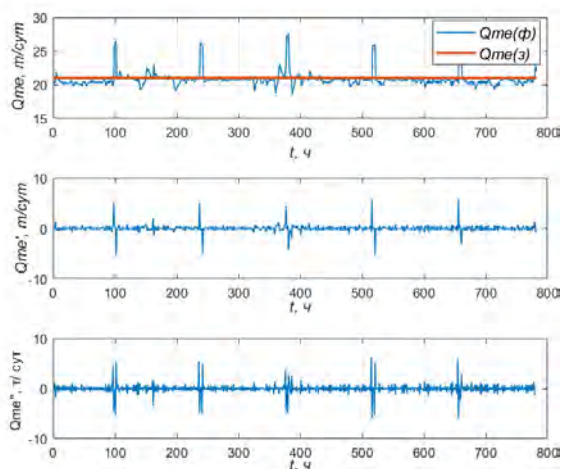


Рис. 2. Временной ряд  $Qme$ ,  $Qme'$ ,  $Qme''$  в частных производных первого и второго порядка за период 32,5 суток плавания. При визуализации ряда  $Qme$  на верхнем рисунке показано также значение заявленного расхода

Уравнение  $\Delta Qme = \{Qme_\phi - Qme_s | \Delta Qme \rightarrow \min\}$ , характеризующее разницу между фактическим расходом и заявленным, является наиболее критическим показателем эффективности рейса и напрямую влияет на дальнейшее заключение Тайм-чартера.

Постоянный мониторинг этого временного ряда, совместно с рядами других параметров рейса выполняет команда ходовой навигационной вахты во главе с капитаном. На основании статического среза, по отклонениям от заданных значений, как правило, происходит корректирование скорости крупнотоннажного танкера, выполняющего продолжительные трансокеанские переходы.

## 3. Задание нечёткости в блоках оценки состояний

Далее в работе поэтапно рассмотрено построение нечётких функций лингвистических переменных по каждому из состояний. Каждое множество в свою очередь является нормальным [7], и его высота:

$$\sup(\mu_i(s_i)) = 1 \quad (3)$$

## 3.1. Задание нечёткости в блоке оценки точности погоды

Предлагается рассмотреть первый блок нечёткой оценки прогноза погоды. Результатом обработки вектора состояний ошибок прогноза погоды ( $\Delta S_{ПП}$ ) является нечёткая лингвистическая переменная, отражающая характер этого прогноза. При планировании длительных рейсов векторный прогноз погоды может включать в себя, но не ограничивается, следующими элементами:

$$ПП = \{K_B(t), v_B(t), K_T(t), v_T(t), h_B(t)\} \quad (4)$$

где:  $K_B(t)$  – направление ветра,  $v_B(t)$  – скорость ветра,  $K_T(t)$  – направление течения,  $v_T(t)$  – скорость течения,  $h_B(t)$  – высота волнения.

Тогда оценка вектора ошибок прогноза может быть определена, как:

$$\Delta ПП(t) = \{\Delta K_B(t), \Delta v_B(t), \Delta K_T(t), \Delta v_T(t), \Delta h_B(t)\} \quad (5)$$

После нормирования вектора ошибок по формуле (1) получается вектор состояний прогноза погоды по каждому из параметров, который поступает в СППР в виде:

$$\Delta S_{ПП} = \{S_{\Delta K_B(t)}, S_{\Delta v_B(t)}, S_{\Delta K_T(t)}, S_{\Delta v_T(t)}, S_{\Delta h_B(t)}\}^T \quad (6)$$

Предполагается, что все измерения свободны от ошибок. Тогда представим оценку этого вектора состояния в качестве нечёткой лингвистической переменной по каждому из её элементов, состоящей из термов-множеств:

$$\xi(S_i) = \left\{ \frac{\mu_1(S_i)}{S_i}, \frac{\mu_2(S_i)}{S_i}, \dots, \frac{\mu_n(S_i)}{S_i} \right\} \quad (7)$$

где применительно к оценке точности прогноза погоды:  $\mu_1(S_i)$  – функция принадлежности к множеству VP (Very Poor),  $\mu_2(S_i)$  – функция принадлежности к множеству P (Poor),  $\mu_3(S_i)$  – функция принадлежности к множеству Av (Average),  $\mu_4(S_i)$  – функция принадлежности к множеству Ac (Acceptable).

Определение границ принадлежности к терму является важным этапом для формирования нечёткости для каждой лингвистической переменной. В основе оценки границ каждого терма лежит опрос агентов, являющихся специалистами в области судовождения, и дальнейшее усреднение полученных оценок [1, 5, 6].

Оценка ошибки в направлениях ветра и течения составлена, исходя из отсчёта направлений в румбах (1 румб = 11.25°). В таблице 1 приведены границы, представляющие параметры a, b для каждого множества. Так как в данном примере функция принадлежности является треугольной, унимодальной, и симметричной относительно экстремума, то  $c = a + (b - a/2)$ .

$$\mu(S_i) = \begin{cases} 0, & S_i \leq a \\ \frac{S_i - a}{b - a}, & a \leq S_i \leq b \\ \frac{c - S_i}{c - b}, & b \leq c \leq S_i \\ 0, & c \leq S_i \end{cases} \quad (8)$$

Таблица 1

Границы оценки точности прогноза погоды

|    | Ac         | Av            | P             | VP          |
|----|------------|---------------|---------------|-------------|
| S1 | [0, 11.25] | [11.25, 22.5] | [22.5, 33.75] | [33.75, 45] |
| S2 | [0, 3]     | [3, 6]        | [6, 10]       | [10, 20]    |
| S3 | [0, 11.25] | [11.25, 22.5] | [22.5, 33.75] | [33.75, 45] |
| S4 | [0, 0.3]   | [0.3, 0.8]    | [0.8, 1.5]    | [1.5, 3.0]  |
| S5 | [0, 0.3]   | [0.3, 0.8]    | [0.8, 1.5]    | [1.5, 3.5]  |

где: S1 = ΔK<sub>B</sub>(t), °; S2 = Δv<sub>B</sub>(t), узл; S3 = ΔK<sub>T</sub>(t), °; S4 = Δv<sub>T</sub>(t), узл; S5 = Δh<sub>B</sub>(t), м.

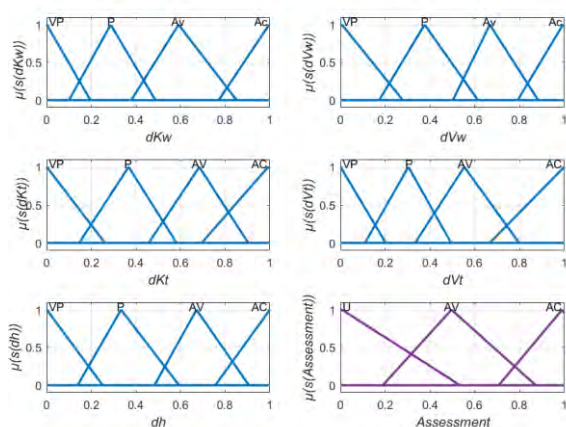


Рис. 3. Пять входных нечётких лингвистических переменных состояний ошибок прогноза погоды и одна выходная лингвистическая переменная, характеризующая оценку точности прогноза погоды

Для обработки входного вектора состояний использован набор простых правил для определения принадлежности к выходному состоянию (Assessment), которое включает в себя три лингвистических определения: A – acceptable, которое означает, что прогноз погоды является приемлемым; Av – average, означающий, что оценка прогноза в данный момент времени не может быть произведена и требуется продолжить выполнение анализа рядов для конечного заключения; и соответственно – U – unacceptable, означает, что текущий прогноз погоды является неудовлетворительным и не может быть использован при расчёте оптимального пути судна.

Модель оценки точности прогноза погоды с помощью нечётких лингвистических переменных в нормированной форме представлена на рисунке 3.

### 3.2. Описание нечёткого блока управления ГД

Рассмотрим второй блок нечёткого управления ГД. Тогда на основании уравнения статического состояния системы можно сформировать вектор входной оценки состояния ГД судна в действительных условиях плавания в момент времени:

$$S(t_i) = \{ S_{\Delta t(ETA)}, S_N, S_{\Delta Qme}, S_{\Delta v} \}^T \quad (9)$$

где: S<sub>Δt(ETA)</sub> – оценка ошибки заявленного времени прибытия судна при условии плавания судна по ЛЗП, Δt(ETA) = t<sub>φ</sub> – t<sub>3</sub>, S<sub>N</sub> – оценка состояния нагрузки ГД, S<sub>ΔQme</sub> – оценка состояния расхода топлива ГД, и S<sub>Δv</sub> – оценка состояния действительной скорости судна, где Δv = v<sub>φ</sub> – v<sub>3</sub>/ Лингвистические характеристики и численные значения, используемые для фазсификации входного вектора состояния в системе нечёткого управления ГД по каждому из его элементов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики лингвистических переменных входного вектора состояний в СППР ГД.

| Δt(ETA)<br>ч | Шифр      | Лин. хар.   | N, %   | Шифр      | Лин. хар. | ΔQme<br>,<br>т | Шифр      | Лин. хар.            | Δv,<br>узел | Шифр      | Лин. хар.   |
|--------------|-----------|-------------|--------|-----------|-----------|----------------|-----------|----------------------|-------------|-----------|-------------|
| 48           | BA        | Big Advance | 0      | VL        | Very Low  | 5              | BO        | Big Overconsumption  | 3           | ML        | Much Low    |
| 24           | A         | Advance     | 45     | L         | Low       | 3              | O         | Overconsumption      | 1.5         | L         | Low         |
| 0            | DT        | Due Time    | 75     | N         | Normal    | 0              | N         | Normal               | 0           | N         | Normal      |
| -6.0         | D         | Delay       | 100    | H         | High      | -3             | U         | Underconsumption     | -1.5        | B         | Bigger      |
| -18.0        | BD        | Big Delay   | –      | –         | –         | -5             | BU        | Big Underconsumption | -3          | MB        | Much Bigger |
| Вид ФП       | Гауссойды |             | Вид ФП | Гауссойды |           | Вид ФП         | Гауссойды |                      | Вид ФП      | Гауссойды |             |



Графики функций принадлежности для термов лингвистических переменных входного вектора состояний в системе нечёткого управления ГД представлены на рисунке 4.

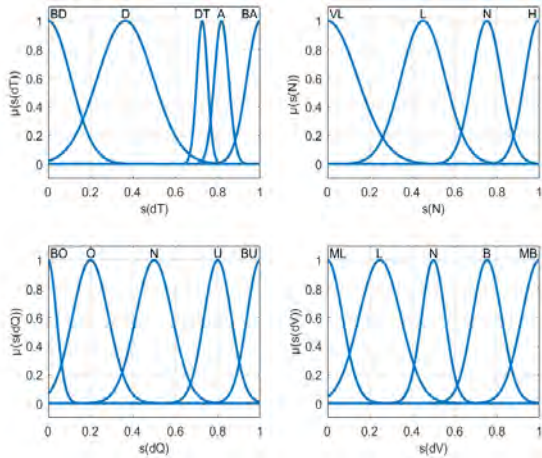


Рис. 4 Графики функций принадлежности для термов лингвистических переменных входного вектора состояний.

В качестве терм-множества выходной лингвистической переменной, которое будет использована для выработки управляющего воздействия на ECS, используется нормированное множество:

$$S_{\Delta RPM} = \{ "BR", "R", "M", "I", "BI" \} \quad (10)$$

где: «BR» – Big reduction – значительное уменьшение RPM, «R» – reduction – уменьшение RPM, «M» – maintain – использовать текущие RPM, «I» – increase – поднять RPM, «BI» – Big increase – существенно увеличить RPM.

При нечёткой формализации этого параметра руководствуются теми решениями, которые используются в условиях конкретного внешнего возмущения, представленного гидрометеорологическими условиями и отражающегося косвенно через показатель обратной связи - «Индекс нагрузки на ГД».

В данном случае предлагается использовать трапециевидную функцию принадлежности, так как она имеет свойство более тонкой настройки, в сравнении с унимодальными функциями. График функции принадлежности выходной лингвистической переменной представлен на рисунке 5.

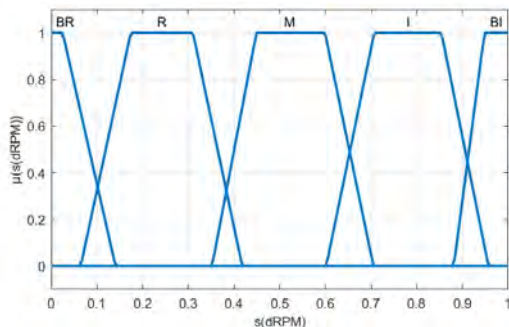


Рис. 5 Графики функций принадлежности для термов выходной лингвистической переменной "S<sub>ΔRPM</sub>".

### 3.3. Построение базы правил при изменении стратегии ГД в системах

В системах нечёткого вывода условия и заключения формулируются в виде нечетких высказываний относительно тех или иных лингвистических переменных [1, 5, 7, 8]. Набор таких высказываний в данном случае определяет базу правил, по которым будет входной вектор состояний преобразовываться в выработанное управляющее воздействие. Корректное формирование базы правил является очень важным этапом при построении систем автоматического управления (САУ).

При управлении танкером, помимо изменения курса, изменение скорости должно соответствовать хорошей морской практике и быть направлено на обеспечение безопасности плавания, обеспечить экологическую безопасность, а также сохранить ресурс ГД. Поэтому приоритеты каждого отдельного состояния должны быть согласованы с приоритетами всех остальных состояний. В данной работе приведены некоторые правила обработки входного вектора:

- R1: if  $S_{\Delta t(ETA)} = DT \wedge S_N = N \wedge S_{\Delta Qme} = N \wedge S_{\Delta v} = N \rightarrow M$
- R2: if  $S_{\Delta t(ETA)} = DT \wedge S_N = H \wedge S_{\Delta Qme} = O \wedge S_{\Delta v} = L \rightarrow R$
- R3: if  $S_{\Delta t(ETA)} = D \wedge S_N = H \wedge S_{\Delta Qme} = BO \wedge S_{\Delta v} = ML \rightarrow BR$
- ...
- R19: if  $S_{\Delta t(ETA)} = BD \wedge S_N = N \wedge S_{\Delta Qme} = N \wedge S_{\Delta v} = N \rightarrow BI$
- R20: if  $S_{\Delta t(ETA)} = D \wedge S_N = N \wedge S_{\Delta Qme} = O \wedge S_{\Delta v} = L \rightarrow I$
- R21: if  $S_{\Delta t(ETA)} = BA \wedge S_N = N \wedge S_{\Delta Qme} = N \wedge S_{\Delta v} = L \rightarrow R$
- R21: if  $S_N = H \wedge S_{\Delta Qme} = BO \rightarrow BR$

Как видно из набора правил, некоторые правила включают в себя все лингвистические переменные, а некоторые только отдельные. Это может зависеть от преобладающих обстоятельств плавания, когда, в зависимости от навигационной обстановки, обеспечение какого-либо состояния является критически важным в то время, как остальным приходится пренебречь.

Для получения чёткого значения управляющего воздействия  $S_{\Delta RPM}$ , соответствующего входному вектору состояний применён метод определения центра тяжести (центроида). Центр тяжести является, в некотором смысле, универсальным компромиссным решением. Поскольку вектор состояния и вектор решений заданы с помощью непрерывных функций, то центр тяжести может быть найден решением интегрального уравнения вида:

$$S_{\Delta RPM} = \frac{\int_{\min S_{\Delta RPM}}^{\max S_{\Delta RPM}} S_{\Delta RPM} \mu(S_{\Delta RPM}) dS_{\Delta RPM}}{\int_{\min S_{\Delta RPM}}^{\max S_{\Delta RPM}} \mu(S_{\Delta RPM}) dS_{\Delta RPM}} \quad (11)$$

В приведённой модели предлагается использовать алгоритм импликации Т-типа по Мамдани (1974 г.), который состоит в определении значения истинности при обработке по сформулированным правилам [3, 4, 5, 6]:

$$A \rightarrow B = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (12)$$

где:  $A$  – совокупность событий, которые влияют на последствия,  $B$  – отклик на предшествующее событие.

На рисунке 5 приведён пример дефаззификации нечёткого множества по методу центроида. В

экспертной СППР нечёткого управления исполнительным устройством является система электронного управления ГД - ME ECS, а также режим планирования перехода в системе ECDIS, которые способны воспринимать команды управления в традиционной численной форме, поэтому на полученном нечетком множестве допустимых управлений нужно выбрать единственное значение в выработанного воздействия. После возвращения полученное значение подаётся в качестве поправки к текущему значению  $RPM_t$ . Тогда новое значение можно вычислить, как:  $RPM_{t+1} = RPM_t + \Delta RPM = 71.9 + (-2.19) = 69.71$  об/мин. В условиях морского перехода, при аналогичном векторе состояния, было принято решение:  $\Delta RPM = -2,0$  об/мин

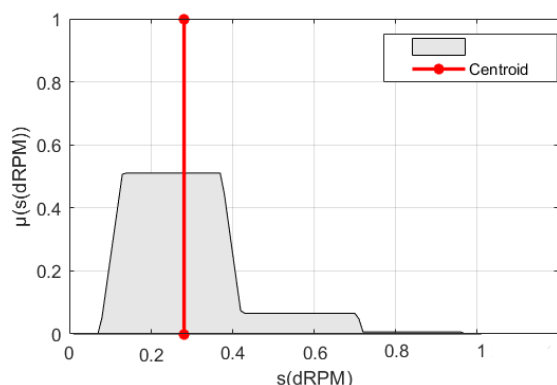


Рис. 6. Дефаззификация нечёткого множества по методу центра, при входном векторе  $S(t) = \{0.7012, 0.811, 0.2988, 0.5622\}^T$ .

### 3.4. Блок принятия решения о перестроении траектории

В третьем блоке САУ принимается решение о перестроении маршрута, а именно: текущее местоположение со своими географическими координатами принимается за начальную точку плавания, и новый граф строится исходя из полученного уточнённого прогноза погоды на более короткий период плавания, с учётом обновлённых

значений вектора состояния и вектора точности прогноза погоды. Выработка решения о перестроении маршрута ( $GR_U$ ) происходит по следующему алгоритму:

$$GR_U = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta RPM \neq 0 \\ 1, & \text{if } Assessment = U \\ 0, & \text{if } Assessment = A \wedge \Delta RPM = 0 \\ 0^*, & \text{if } Assessment = Av \wedge \Delta RPM = 0 \end{cases} \quad (13)$$

где:  $0^*$  - означает, что необходимо дополнительное время для получения более достоверной оценки.

### Заключение

В данной работе рассмотрена модель САУ, основанная на применении нечётких функций и нечёткой логики в задачах управления скоростью судна при следовании его по ЛЗП, полученной в результате оптимизации пути на графе. Результаты, выработанные нечёткой моделью, схожи с теми решениями, которые может принять судоводитель при управлении судном.

Данная экспертная СППР имеет ряд ограничений:

- управление судном выполняется только в режиме «Следование по ЛЗП»;
- отсутствие возможности расчёта манёвра изменением скорости при расхождении с другим судном или каким-либо объектом;
- невозможность учёта нештатных или аварийных ситуаций;
- необходимость определения периода обработки входного вектора;
- субъективность численных значений центров и границ термов в нечётком множестве лингвистической переменной;
- база правил обработки должна быть корректно составлена и противоречивые утверждения нужно стараться избегать.

При возникновении ситуации, которые не входят в область выработки решений, данной СППР, следует использовать другого агента, обученного решать те задачи, которые применимы к преобладающим обстоятельствам и условиям.

### Литература

1. Дидэ. Методы анализа данных. Подход, основанный на методе динамических сгущений / Дидэ [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 240 с.
2. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
3. Колмогоров А.Н., Драгилин А.Г. Математическая логика. — М.: КомКнига, 2006. — 240 с. — ISBN 5-484-00520-5.
4. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ Петербург, 2005. — 736 с.: ил
5. Основы нечеткой логики: Учебно-методическое пособие к практическим занятиям и лабораторным работам / Д.Р. Григорьева, Г.А. Гареева, Р.Р. Басыров - Набережные Челны: Изд-во НЧИ КФУ, 2018. - 42 с.
6. 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.
7. Чернов, В. Г. Основы теории нечетких множеств: учеб. пособие / В.Г. Чернов; Владимирского гос. ун-т.- Владимир: Изд-во Владимирского. гос. ун-та, 2010. – 96 с. – ISBN 978-5-9984-0055-1.
8. Fuzzy sets and systems: Theory and applications. Academic Press 1980, Mathematics in Sciences and Engineering vol. 144. D. DUBOIS, H. PRADE.

### References

1. Dide. Metody analiza dannykh. Podkhod, osnovanny na metode dinamicheskikh sgushcheniy /Dide [i dr.]. – M.: Finansy i statistika, 1985. – 240 s..
2. Zade, L. A. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy / L.A. Zade: per. s angl. –M.: Mir, 1976. – 165 s.
3. Kolmogorov A.N., Dragilin A.G. Matematicheskaya logika. — M.: KomKniga, 2006. — 240 s. — ISBN 5-484-00520-5.
4. Leonenkov A. V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. — SPb.: BKhV Peterburg, 2005. — 736 s.: il
5. Osnovy nechetkoy logiki: Uchebno-metodicheskoe posobie k prakticheskim zanyatiyam i laboratornym rabotam / D.R. Grigor'eva, G.A. Gareeva, R.R. Basyrov - Naberezhnye Chelny: Izd-vo NChI KFU, 2018. - 42 s.
6. Simankov, V.S. Osnovnye metodologicheskie aspekty organizatsii i funktsionirovaniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy bezopasnosti sudovozhdeniya [Tekst] V.S. Simankov, V.V. Astrein //Ekspluatatsiya morskogo transporta № 2(79), Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2016. –S. 56-64.
7. Chernov, V. G. Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv: ucheb. posobie / V.G. Chernov; Vladimirovskogo gos. un-t.- Vladimir: Izd-vo Vladimirovskogo. gos. un-ta, 2010. – 96 s. – ISBN 978-5-9984-0055-1.
8. Fuzzy sets and systems: Theory and applications. Academic Press 1980, Mathematics in Sciences and Engineering vol. 144. D. DUBOIS, H. PRADE.

### 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 13.12.2021; одобрена после рецензирования 28.02.2022, принята к публикации 04.03.2022.

The article was submitted 13.12.2021; approved after reviewing 28.02.2022; accepted for publication 04.03.2022.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 656.62: 504.4.054

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.025>

### Оценка риска экологических 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.** Транспортная и экологическая безопасность напрямую связана с системой реагирования, для отлаженной работы которой необходима система прогнозирования экологических рисков. Существующие в настоящее время модели оценки риска в основном связаны с оценкой вероятности транспортных происшествий. Кроме того, большинство моделей рассматривают экологические риски только от транспортных происшествий с нефтеналивными судами и в основном на море. Данная работа является продолжением работ автора в направлении оценки экологического риска от транспортных происшествий на внутренних водных путях. Предложенная ранее методика оценки апробируется в данной работе на данных о транспортных происшествиях в Волжском бассейне. При этом объектом анализа стали транспортные происшествия с сухогрузными судами. Среди источников убытков были рассмотрены: сброс грузов в результате повреждения корпуса судна, сброс нефтесодержащих вод, сточных вод, мусора, разлив нефти из расходных цистерн сухогрузных судов при аварии, а также убытки, связанные с затоплением судов. В результате выполненных исследований была создана классификация участков концентрации транспортных происшествий по уровню возможного экологического риска.

**Ключевые слова:** транспортные происшествия; сухие грузы; экологический риск; экологическая безопасность; экологический ущерб; водный транспорт

**Благодарности:** автор выражает благодарность Пластинину Андрею Евгеньевичу за представление отдельных данных по транспортным происшествиям.

**Финансирование:** исследование выполнено за счет средств Волжского государственного университета водного транспорта.

**Для цитирования:** Домнина О.Л. Оценка риска экологических последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами на примере Волжского бассейна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 187—193

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.025>

### Risk Assessment of Environmental Consequences from Transport Accidents with Dry Cargo Vessels 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.** Transport and environmental safety is directly related to the response system, for the smooth operation of which a system for predicting environmental risks is needed. Currently existing risk assessment models are mainly related to the assessment of the probability of traffic accidents. In addition, most models consider environmental risks only from transport accidents with oil tankers and mainly at sea. This work is a continuation of the author's work in the direction of assessing the environmental risk from traffic accidents on inland waterways. The previously proposed assessment methodology is tested in this paper on data on traffic accidents in the Volga basin. At the same time, transport accidents with dry cargo ships became the object of analysis. Among the sources of losses were considered: the discharge of cargo as a result of damage to the ship's hull, the discharge of oily water, sewage, debris, oil spills from service tanks of dry cargo ships in the event of an accident, as well as losses associated with the flooding of ships. As a result of the performed studies, a classification of areas of concentration of traffic accidents was created according to the level of possible environmental risk.

**Keywords:** accidents; dry cargo; environmental risk; environmental Safety; environmental damage; water transport

**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. Part. 1, no. 1. P. 187—193

## Введение

Для разработки системы реагирования в случаях транспортных происшествий (ТП) на водном транспорте важным условием является оценка экологического риска. Это необходимо для использования полученных прогнозов обоснования уровня реагирования и оценки их эффективности [1-6].

В тоже время большинство проанализированных работ посвящены разливам нефти и сбросам опасных грузов на морских акваториях [7-15], а вопросу прогнозирования и оценки экологических рисков сыпучих грузов как на море, так на внутренних водных путях уделено мало внимания.

Вместе с тем, как отмечено в работе [16], установлено, что более 2,15 миллиона тонн навалочных грузов ежегодно могут попадать в водную среду, сделан вывод о наличии затруднений при проведении оценки их угрозы водной среде из-за недостатка информации.

Поэтому автор при проведении анализа остановился на анализе ТП, сопровождающихся сбросом именно сыпучих грузов. Данное исследование является логическим продолжением более ранних работ, выполненных с участием автора. Так, в работе [17] была предложена модель оценки экологического риска, а в работе [18] - методика оценки размера экологического вреда при сбросе сыпучих грузов.

Целью данной работы является апробация предложенной ранее математической модели оценки экологического риска на примере ТП с сухогрузными судами в границах Волжского бассейна.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- определить вероятность нанесения экологического вреда по различным группам факторов экологического загрязнения;
- определить риск ТП с учетом этих факторов;
- рассчитать совокупный экологический риск ТП;
- выполнить классификацию укрупненных участков ТП по размеру экологического риска;
- проанализировать полученные результаты и провести картографирование экологического риска.

## Материалы и методы

Автор провел анализ статистической информации по транспортным происшествиям в границах Волжского бассейна за период с 2007 по 2018 годы. Источник информации - Федеральная служба по надзору в сфере транспорта. Статистическая информация, заложенная в сформированную базу данных, включает 2166 транспортных происшествий в границах Волжского бассейна и содержит следующие сведения: место ТП, его дату, вид аварии, задействованные в аварии суда, причину происшествия. На основании этих данных были выявлены факторы, оказывающие влияние на экологический риск возникновения ТП с судами (рис.1).



Рис.1. Структура экологического риска 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;
- учитываемыми источниками убытков от ТП неэкологического характера являются:
  - = загрязнение грузом;
  - = загрязнение нефтесодержащими водами;
  - = загрязнение сточными водами;
  - = загрязнение мусором с судна;
  - = загрязнение затоплением судна.

Расчет вероятностей экологического риска выполнялся в соответствии с моделью, подробно описанной в работе [18].

## Результаты и обсуждение

Расчет вероятностей ТП был выполнен на основе базы данных по 13 субъектам РФ, расположенными в Волжском бассейне. Количество ТП в границах данного бассейна с сухогрузным флотом составило 286 случаев, в восьми из которых произошло повреждение корпуса судна, сопровождающееся сбросом груза. Учитывался сброс следующих видов грузов: удобрений, соли и песчано-гравийных смесей.

Условная частота сброса указанного груза составила 0,0279, частота сброса груза в результате ТП - 0,67 год<sup>-1</sup>. Результат расчета вероятности нанесения вреда по укрупненным участкам концентрации ТП Волжского бассейна представлен в табл. 1.

На основании формул из более ранней работы автора [17] были рассчитаны среднестатистические значения вреда от отдельных видов экологического риска. Для этого использовались исходные данные, представленные в табл.2.

Таблица 1

Результаты расчета частоты нанесения вреда сухими грузами в границах Волжского бассейна (фрагмент)

| Граница участка аварийности, км | Субъект РФ          | Частота ТП с сухогрузом, 1/год | Частота сброса груза, 1/год |
|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 524,0-529,0                     | Ярославская обл.    | 0,08333333                     | 0,002325                    |
| 857,0-858,0                     | Нижегородская обл.  | 0,25                           | 0,006975                    |
| 860,0-860,0                     | Нижегородская обл.  | 0,08333333                     | 0,002325                    |
| 862,0-869,0                     | Нижегородская обл.  | 0,91666666                     | 0,025575                    |
| 874,0-878,0                     | Нижегородская обл.  | 0,08333333                     | 0,002325                    |
| ...                             | ....                | ....                           | ....                        |
| 2784,0-2786,0                   | Астраханская обл.   | 0,33333333                     | 0,0093                      |
| 2792,0-2798,0                   | Астраханская обл.   | 0,33333333                     | 0,0093                      |
| 2815,-2817,0                    | Республика Калмыкия | 0,25                           | 0,006975                    |
| 2941,0-2943,0                   | Астраханская обл.   | 0,25                           | 0,006975                    |

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета вреда по отдельным видам экологического риска

| Показатель  | Ед. измерения  | Значение |
|---|----------------|----------|
| Коэффициент, учитывающий состояние водных объектов  | -              | 1,41     |
| Коэффициент, учитывающий длительность периода воздействия нефтепродукта на водный объект при непринятии мер по его ликвидации | -              | 1,1      |
| Коэффициент интенсивности воздействия нефтепродуктов на водный объект   | -              | 5        |
| Объем цистерны для накопления нефтесодержащих вод   | м <sup>3</sup> | 125      |
| Средняя концентрация нефтепродуктов в нефтесодержащих водах   | мг/л           | 45000    |
| Предельно-допустимая концентрация нефтепродуктов в воде   | мг/л           | 0,05     |
| Коэффициент загрязненности акватории водного объекта судовым мусором  | балл           | 3        |

| Показатель   | Ед. измерения            | Значение |
|--|--------------------------|----------|
| Масса сброшенного нефтепродукта из расходных цистерн                             | т                        | 3,5      |
| Такса для расчета размера убытка от сброса нефтепродуктов из нефтесодержащих вод | млн. руб./т              | 0,67     |
| Коэффициент, учитывающий инфляцию  | -                        | 1,8      |
| Такса для расчета вреда от загрязнения мусором                                   | млн. руб./т              | 0,04     |
| Такса для расчета вреда от загрязнения мусором                                   | млн. руб./м <sup>2</sup> | 0,0008   |
| Такса для расчета вреда от сброса сточных вод                                    | млн. руб.                | 0,01     |
| Такса для расчета вреда при загрязнении нефтепродуктами                          | Млн. руб.                | 3,35     |
| Среднее выборочное значение грузоподъемности судна                               | т                        | 1903     |
| Вред от сброса нефтесодержащих вод   | млн. руб.                | 29,891   |
| Вред от сброса сточных вод   | млн. руб.                | 0,0317   |
| Вред от сброса мусора  | млн. руб.                | 0,2284   |
| Вред от затопления судна   | млн. руб.                | 241,49   |
| Вред от сброса нефтепродуктов  | млн. руб.                | 11,690   |

Максимально возможный сброс загрязняющих веществ был принят для условий межени по средней грузоподъемности судна.

В среднем, по экспертной оценке, из расходных цистерн выливается при аварии от 2 до 5 т нефтепродукта. Для расчетов принято значение 3,5 т.

Оценка различных ущербобразующих факторов, влияющих на размер вреда (глубина загрязнения, его ширина, скорость течения) выполнена автором с использованием программного продукта «PISCES 2». С его помощью был воспроизведен процесс взаимодействия и распространения загрязнения с окружающей средой.

Методика оценки возможного размера вреда при сбросе сыпучих грузов основывается на учете агрессивности ингредиентов различных видов грузов и условных вероятностей их сброса, времени и места сброса, длительности воздействия и подробно была описана в работе [18]. Результаты расчета итогового экологического риска представлены в табл.3.

Таблица 3

Результаты экологического риска от ТП в Волжском бассейне (фрагмент)

| Граница УКТП, км | Субъект РФ          | Вред от сброса груза, млн. руб. | Риск от сброса груза, млн. руб./год | Риск от сброса нефти, млн. руб./год | Риск от сброса нефтесодержащих вод, млн. руб./год | Риск от сброса сточных вод, млн. руб./год | Риск от сброса мусора, млн. руб./год | Риск от затопления судна, млн. руб./год | Итоговый экологический риск, млн. руб./год |
|------------------|---------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|---|--------------------------------------|---|--|
| 524,0-529,0      | Ярославская обл.    | 1433,05                         | 0,277654                            | 0,02718                             | 0,069496  | 0,000073                                  | 0,000531                             | 0,561466                                | 3,99059                                    |
| 857,0-858,0      | Нижегородская обл.  | 1428,74                         | 2,491370                            | 0,08154                             | 0,208489  | 0,000221                                  | 0,001593                             | 1,684398                                | 11,94172                                   |
| 860,0-860,0      | Нижегородская обл.  | 1433,05                         | 0,277654                            | 0,02718                             | 0,069496  | 0,000073                                  | 0,000531                             | 0,561466                                | 3,990595                                   |
| 862,0-869,0      | Нижегородская обл.  | 1424,43                         | 33,39403                            | 0,29898                             | 0,764459  | 0,000811                                  | 0,005842                             | 6,176125                                | 43,67608                                   |
| 874,0-878,0      | Нижегородская обл.  | 1428,74                         | 0,276818                            | 0,027181                            | 0,069496  | 0,000073                                  | 0,000531                             | 0,561466                                | 3,980574                                   |
| 884,0-889,0      | Нижегородская обл.  | 1411,50                         | 9,845223                            | 0,163085                            | 0,416978  | 0,000442                                  | 0,003186                             | 3,368795                                | 23,64293                                   |
| 857,0-858,0      | Нижегородская обл.  | 1428,74                         | 4,442464                            | 0,10872                             | 0,277985  | 0,000295                                  | 0,002124                             | 2,245864                                | 15,96238                                   |
| ...              | ...                 | ...                             | ...                                 | ...                                 | ...   | ...                                       | ...                                  | ...                                     | ...  |
| 2784,0-2786,0    | Астраханская обл.   | 1411,50                         | 4,375655                            | 0,10872                             | 0,277985  | 0,000295                                  | 0,002124                             | 2,245864                                | 15,76195                                   |
| 2792,0-2798,0    | Астраханская обл.   | 1411,50                         | 4,375655                            | 0,10872                             | 0,277985  | 0,000295                                  | 0,002124                             | 2,245864                                | 15,76195                                   |
| 2815,-2817,0     | Республика Калмыкия | 937,815                         | 1,635315                            | 0,08154                             | 0,208489  | 0,000221                                  | 0,001593                             | 1,684398                                | 8,517505                                   |
| 2941,0-2943,0    | Астраханская обл.   | 754,146                         | 1,315042                            | 0,081154                            | 0,208489  | 0,000221                                  | 0,001593                             | 1,684398                                | 7,236414                                   |

С помощью формулы Стерджесса и рекомендаций Йетса проведено ранжирование участков концентрации ТП по экологическому риску

от ТП с сухогрузами с последующей классификацией по степени опасности (табл. 4).

Таблица 4

Классификация участков концентрации ТП по размеру экологического риска с сухогрузами в границах Волжского бассейна

| № класса | Наименование       | Участки-представители, км   | Диапазон риска, млн. руб. |
|----------|--------------------|---|---------------------------|
| 1        | С высоким риском   | 862-869; 1303-1313; 884-889; 901-902; 1314-1320   | 43,676-16,881             |
| 2        | С умеренным риском | 894-899; 2643-2647; 903-906; 2784-2786; 27-92-2798; 2574-2580; 2581-2584; 2745-2746; 857-858; 908-920; 2726-2729;   | 16,880 -10,183            |
| 3        | С низким риском    | 1277-1288; 2227-2232; 1388-1393; 1527-1528; 2815-2817; 2550-2552; 2941-2943; 1322-1325; 1675-1677; 2160-2168; 1353-1365; 1378-1382; 1731-1743; 1069-1070; 2516-2524; 524-529; 860-860; 874-878; 1190-1190; 933-936; 1922-1924 | 10,182-2,080              |

На основании разработанной классификации экологического риска была выполнена процедура картографирования экологического риска. В качестве примера в данной работе приведен фрагмент карты на участке Городец – Нижний Новгород, где представлены участки с разной степенью экологического риска (рис. 2).

нанесены особо охраняемые территории и водозаборы. Это связано с тем, что при загрязнении воды рядом с ними могут появляться также дополнительные экологические риски, в данной статье не учтенные, но имеющие значение при разработке системы реагирования в случаях транспортных происшествий.

На рисунке помимо речного участка с разбиением на участки с разной степенью экологического риска,

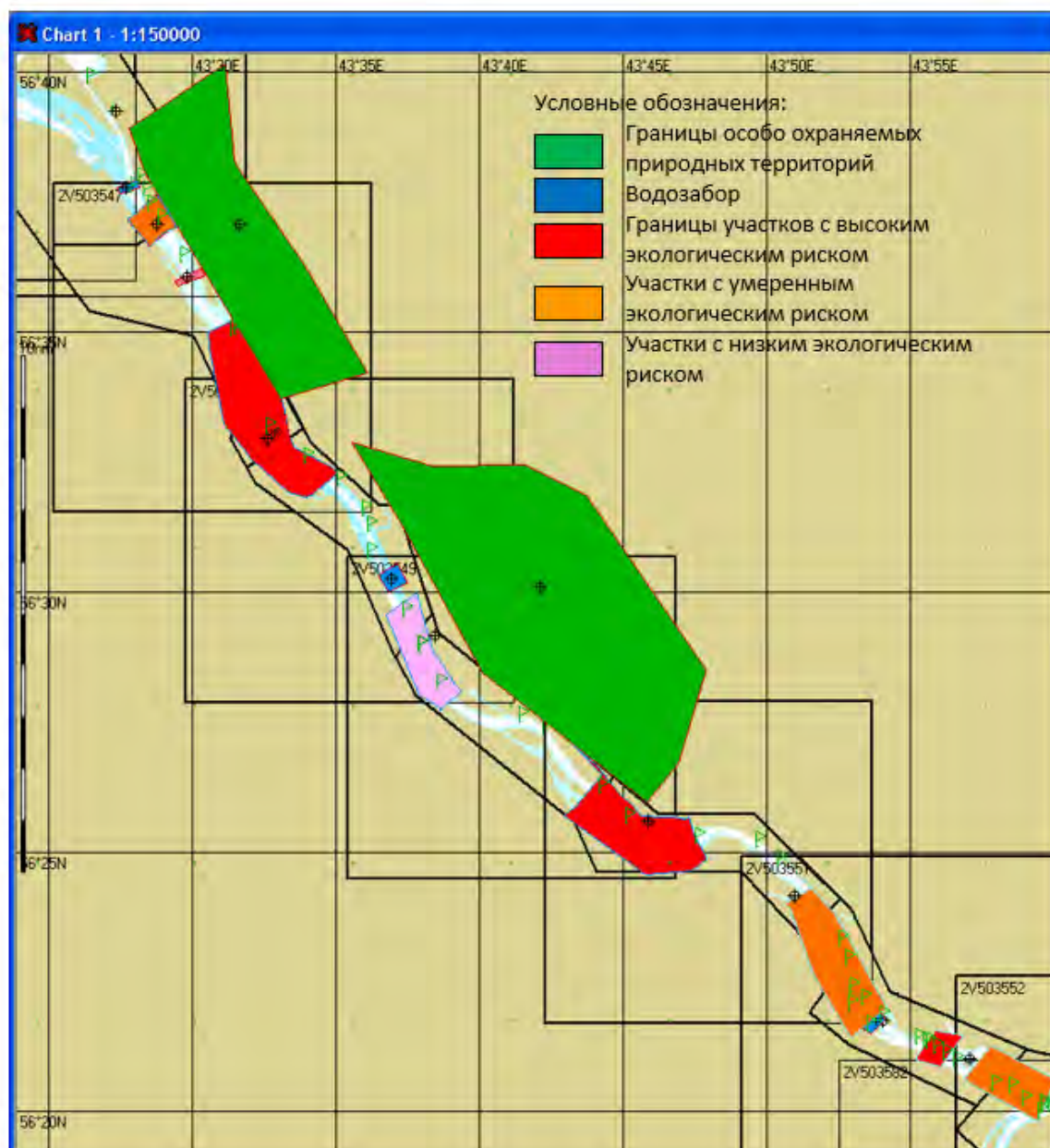


Рис.2. Картографирование рек Волжского бассейна по степени экологического риска (фрагмент участка Городец-Нижний Новгород, масштаб 1:150000)

### Заключение

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

- получена апробация разработанной ранее методики оценки экологического риска;
- создана классификация участков концентрации ТП по уровню экологического риска;

- проведено картографирование рек Волжского бассейна по степени экологического риска.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование системы реагирования в случае ТП на внутреннем водном транспорте и учет помимо экологического риска дополнительных рисков транспортных предприятий в случае аварий.

### 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. Пластинин А.Е. Оценка ожидаемого ущерба водным объектам при разливах нефти. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 1 (20). С. 97-104.
4. 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.
5. Пластинин А.Е. Оценка загрязнения при разливе нефти на водную поверхность. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 2. С. 129-135.
6. Решняк В.И., Пластинин А.Е., Наумов В.С., Слюсарев А.С. Применение озона в процессах очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 168-173.
7. 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)
8. 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), с. 1751-1759 (2012)
9. 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)
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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
14. 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
15. 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
16. Matthias Grote, Nicole Mazurek, Carolin Gräbsch, Jana Zeilinger, Stéphane Le Floch, Dierk-Steffen Wahrenndorf, Thomas Höfer, Dry bulk cargo shipping — An overlooked threat to the marine environment?, Marine Pollution Bulletin, Volume 110, Issue 1, 2016, Pages 511-519.
17. Домнина О.Л., Захаров В.Н., Отделкин Н.С., Пластинин А.Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-2 (42). С. 79-86.
18. 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

#### 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, С. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
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). С. 79-84.
3. Andrey E. Plastinin, Estimation of the expected damage to water bodies in case of oil spills. Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet. Admiral S.O. Makarov. 2013. No. 1 (20). pp. 97-104.
4. Alexey N. Borodin N. Improving simulator training for oil spill response during the operation of ships on inland waterways. Science and sustainable development of society. Legacy of V.I. Vernadsky. 2009. No. 9. S. 259-260.
5. Andrey E. Plastinin Estimation of pollution in case of oil spill on the water surface. Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after. Admiral S.O. Makarov. 2013. No. 2. S. 129-135.
6. Valery I. Reshnyak, Andrey E. Plastinin, Viktor S. Naumov, Anatoliy S. Slyusarev, The application of ozone in the processes of oil-containing bilge water purification. Marine intellectual technologies. 2019. № 4-2 (46). С. 168-173.
7. 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)
8. 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), с. 1751-1759 (2012)
9. 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)

10. 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
11. 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
12. 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
13. 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
14. 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
15. 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
16. Matthias Grote, Nicole Mazurek, Carolin Gräbsch, Jana Zeilinger, Stéphane Le Floch, Dierk-Steffen Wahrendorf, Thomas Höfer, Dry bulk cargo shipping — An overlooked threat to the marine environment?, Marine Pollution Bulletin, Volume 110, Issue 1, 2016, Pages 511-519.
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. 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

#### 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 17.01.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 27.02.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 27.02.2022.

**Научная статья**

УДК 502.51(282.247.41):504.5:665.6

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.026>

## Моделирование погружения темных нефтепродуктов при разливе на водную поверхность

В.С. Наумов<sup>1</sup> kaf\_oospb@vsuwt.ru, А.Е. Пластинин<sup>1</sup> plastininae@yandex.ru, А.Н. Каленков<sup>1</sup> kaf\_oospb@vsuwt.ru, Н.С. Родина<sup>1</sup> rodina\_n\_s@mail.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы прогнозирования подводного движения нефтяного загрязнения на основе применения методов математического моделирования. В качестве анализируемого процесса выбрано погружение темных нефтепродуктов при разливе на водную поверхность. Целью работы является разработка математической модели для оценки параметров области погружения, ориентированной на разлив темных нефтепродуктов с учетом температуры воды водоема. Практически каждая аварийная ситуация, связанная с разливом темных нефтепродуктов, сопровождается значительным загрязнением дна водоема. Для оценки последствий таких разливов авторами разработано математическое описание подводного движения нефтяного пятна. Для этого на первом этапе выявлены факторы, оказывающие значительное влияние на процесс погружения нефтепродуктов. На втором этапе применена теория эксперимента для оценки требуемого количества сценариев распространения нефтяного загрязнения. Каждый сценарий характеризуется определенным набором значимых факторов. На третьем этапе определены параметры расчетной области и выполнено численное моделирование процесса погружения. В результате численного эксперимента получен массив данных, достаточный для построения регрессионной модели оценки параметров области возможного погружения нефтяного загрязнения. В результате получены уравнения связи, обеспечивающие расчет следующих параметров области загрязнения: время погружения, координаты крайних точек, длина и ширина. Полученные регрессионные зависимости необходимы для оценки вреда компонентам природной среды и разработки мероприятий по локализации и ликвидации нефтяного загрязнения, возникающего при разливе темных нефтепродуктов.

**Ключевые слова:** разлив нефти, темные нефтепродукты, область погружения нефтяного загрязнения, прогнозирование подводного движения

**Благодарности:** авторы выражают благодарность Игорю Константиновичу Кузьмичеву за предоставление данных.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет средств Волжского государственного университета водного транспорта

**Для цитирования:** Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков А.Н., Родина Н.С. Моделирование погружения темных нефтепродуктов при разливе на водную поверхность, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 194—201

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.026>

## Simulation of the immersion of dark oil products upon spill on the water surface

Viktor S. Naumov<sup>1</sup> kaf\_oospb@vsuwt.ru, Andrey E. Plastinin<sup>1</sup> plastininae@yandex.ru, Aleksandr N. Kalenkov<sup>1</sup> kaf\_oospb@vsuwt.ru, Natalia S. Rodina<sup>1</sup> rodina\_n\_s@mail.ru

<sup>1</sup>Volga State University of Water Transport

**Abstract.** The article discusses the issues of predicting the underwater movement of oil pollution based on the use of mathematical modeling methods. As the analyzed process, the immersion of dark oil products upon spillage on the water surface was chosen. The aim of the work is to develop a mathematical model for estimating the parameters of the subsidence area, focused on the spill of dark oil products, taking into account the water temperature of the reservoir. Almost every emergency related to the spill of dark oil products is accompanied by significant pollution of the bottom of the reservoir. To assess the consequences of such spills, the authors have developed a mathematical description of the underwater movement of an oil slick. For this, at the first stage, factors have been identified that have a significant impact on the process of immersion of oil products. At the second stage, the experimental theory was applied to assess the required number of scenarios for the spread of oil pollution. Each scenario is characterized by a specific set of significant factors. At the third stage, the parameters of the computational domain were determined and numerical modeling of the immersion process was performed. As a result of a numerical experiment, an array of data was obtained that is sufficient for constructing a regression model for estimating the parameters of the area of possible immersion of oil pollution. As a result, the equations of connection are obtained, which provide the calculation of the following parameters of the contaminated area: immersion time, coordinates of extreme points, length and width. The obtained regression dependencies are necessary to assess the harm to the components of the natural environment and to develop measures for the containment and elimination of oil pollution arising from the spill of dark oil products.

**Keywords:** oil spill, dark oil products, oil pollution immersion area, prediction of underwater movement

**Acknowledgments:** the authors are grateful to Igor K. Kuzmichev for providing the data

**Financial Support:** the study was carried out at the expense of the Volga State University of Water Transport

**For citation:** 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

### Введение

Аварийные ситуации, связанные с разливом темных нефтепродуктов, сопровождаются значительным загрязнением дна водоемов, представляют значительную опасность для окружающей среды и требует оперативного реагирования [1 – 3]. Важнейшими вопросами, возникающими при разработке оперативных мероприятий по локализации и ликвидации таких разливов, является прогнозирование времени и места погружения (затопления) нефтепродуктов на дно водоема [4 – 6].

Поэтому существует необходимость создания математического описания для оценки параметров области возможного погружения нефти, в котором в качестве независимых факторов рассматриваются масса и тип разлитого нефтепродукта, скорость течения, глубина водоема, температура воды водоема [7]. Кроме этого целесообразно построение и применение математических моделей для оценки параметров области погружения, ориентированных на конкретные виды нефтепродуктов и, в частности на один из наиболее распространенных видов, темные нефтепродукты.

Среди научных публикаций, посвященных прогнозированию подводного движения нефтепродуктов, прежде всего, следует выделить исследование характеристик подводного растекания и миграционного закона утечки нефти, выполненное в Китайском нефтяном университете Циндао [8], в котором отмечается, что после утечки нефти и газа могут возникнуть большие угрозы и ущерб природной экосистеме и морской среде и поэтому крайне важно разработать стратегию быстрого реагирования, включающую точное прогнозирование пути миграции нефти и газа. Для исследования характеристик подводного растекания и закона миграции утечки нефти используются модель объема жидкости (VOF) и  $k-\epsilon$  модель турбулентности. Авторами [8] предложена формула для прогнозирования диффузии нефти за определенное время, результаты исследования могут быть применены для обоснования действий в чрезвычайной ситуации.

Модель оценки экологического риска разливов нефти в Арктике представлена в совместной работе [9] ученых Университета Тасмании и Университета Маккуори (Австралия) и Мемориального университета Ньюфаундленда (Канада). В данной статье представлена вероятностная методология оценки экологического риска (ERA) аварийных разливов нефти в арктическом регионе, связанного с активизацией разведочных работ по поиску нефти и газа в Северном Ледовитом океане. Модель, основанная на динамической байесовской сети (DBN), разработана для оценки экологического риска для водных гидробионтов и позволяет учитывать сезонные изменения.

Университетом Саймона Фрейзера (Британская Колумбия, Канада) и Университетом Кипра (Никосия, Кипр) [10] разработана новая модель нефтяного шлейфа для прогнозирования разливов нефти на

любой заданной глубине ниже поверхности моря. Модель шлейфа, описанная в этой статье, является одним из многочисленных модулей хорошо зарекомендовавшей себя модели разлива нефти MEDSLIK.

Следует согласиться с мнением международного коллектива ученых из Великобритании, Норвегии, Бельгии и США [11], о том, что по мере того, как запасы нефти в легкодоступных бассейнах истощаются, разведка и добыча перемещаются в ранее не эксплуатируемые районы континентального шельфа со значительными глубинами. Например, Фарерско-Шетландский канал (северо-восточная Атлантика) и прилегающие районы стали объектом повышенного внимания нефтяной промышленности. Окружающая среда в этом регионе характеризуется экстремальными глубинами, высокими волнами, сильными ветрами и течениями, сложными схемами циркуляции, резкими градиентами плотности воды. Такие условия создают проблемы для реагирования на разливы нефти и ставят под сомнение пригодность существующих систем прогнозирования для адекватного моделирования поведения потенциальных источников опасности в этом районе.

В работе [12] ученых Океанического университета Китая и Института океанологии Китайской академии наук в Циндао на основе верифицированной модели подводного разлива нефти проведена серия численных экспериментов для изучения влияния океанических течений на движение разлитой под водой нефти по трем параметрам: положение центра тяжести, площадь и объем. Численный результат показал, что неточности в моделировании океанских течений приводит к увеличению ожидаемой ошибки модели прогноза для всех трех показателей с учетом разного модельного времени.

В Юго-западном нефтяном университете Китая выполнено экспериментальное исследование распространения разлива нефти под водой в потоке [13]. Продолжением работы [13] является статья этих же авторов [14], в которой проведено численное исследование подводного распространения и поверхностного дрейфа нефти, под совместным действием волны и течения, с целью изучения влияния физической среды океана, потока утечки, плотности и вязкости разлитой нефти. Результаты расчетов показали: при совместном действии волны и течения наблюдаются большой объем подводного растекания; плотность нефти оказывает очевидное влияние на подводное распространение; точный прогноз распространения под водой нефтяных разливов важен для аварийного реагирования и предупреждения огромных экономических потерь и ущерба окружающей среде, вызванных авариями с разливом нефти в море.

Автономный подводный робот для отслеживания и мониторинга подводных шлейфов после разливов нефти создан японскими и североамериканскими учеными в работе [15]. Данное исследование является ответным действием на уроки аварии с разливом нефти Deepwater Horizon у побережья Луизианы в Мексиканском заливе в 2010 году. Робот

предложен и испытан в качестве ядра для системы раннего обнаружения и мониторинга как одной из технологических мер предупреждения аварий для морских систем добычи нефти и газа. Задача робота - следить не только за детальной структурой нефтяных и газовых шлейфов в водной толще, но и за изменяющейся во времени структурой переноса нефтяных капель в трехмерном пространстве. Предлагаемая система с использованием автономного подводного робота способна проводить измерения концентрации растворенных веществ, глубинных течений, необходимых для раннего обнаружения и мониторинга разливов нефти и утечек газа из морских месторождений. Робот обеспечивает океанографическое моделирование данными в реальном режиме времени для воспроизведения трехмерной структуры нефтяных и газовых шлейфов.

Государственной ключевой лабораторией океанической инженерии Шанхайского университета и Общим исследовательским институтом Китайской национальной морской нефтяной корпорации на основе подхода Лагранжа разработана численная модель для прогнозирования подводного переноса нефти [16]. Достоверность модели подтверждается путем сравнения прогнозов с данными, полученными в ходе полевого (натурного) эксперимента.

Отдельным направлением исследований в области подводного движения нефтяного загрязнения являются работы, посвященные разработке технологий очистки нефтесодержащих сточных вод с применением нановолоконных мембран [17] и разделения эмульсий при добыче нефти решетками со специальными гладкими покрытиями [18]. Данные исследования представляют интерес для разработки технологии локализации и ликвидации подводных разливов нефти.

Выполненный обзор литературных источников подтвердил актуальность планируемых исследований и выявил отсутствие работ, связанных с оценкой влияния температуры воды водоема на параметры области погружения нефти.

Таким образом, целью работы является разработка математической модели для оценки параметров области погружения, ориентированной на разлив темных нефтепродуктов с учетом температуры воды водоема.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- выявление факторов, оказывающих значительное влияние на процесс погружения темных нефтепродуктов;
- оценка требуемого количества сценариев распространения нефтяного загрязнения и их характеристик;
- определение параметров расчетной области и выполнение численного моделирования процесса погружения темных нефтепродуктов;
- проведение численного эксперимента и получение массива данных, достаточного для построения регрессионной модели оценки параметров области возможного погружения темных нефтепродуктов;
- получение уравнений связи, обеспечивающих расчет следующих параметров области загрязнения: время погружения, координаты крайних точек и центра, длины, ширины и площади;

- оценка качества полученного математического описания.

### Материалы и методы

Численное моделирование сценариев погружения нефти выполнялось в программном продукте FlowVision.

В качестве факторов рассматривались: время погружения, площадь области погружения, длина, ширина, координаты крайних точек, плотность нефтепродукта, скорость течения, масса разлива, глубина водоема, атмосферное давление и температура воды.

Оценки площади области погружения, соответствующие экстремальным значениям независимых факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние факторов на площадь области погружения темных нефтепродуктов

| Наименование фактора                       | Значения независимых факторов | Значения площади области погружения, м <sup>2</sup> |
|--|-------------------------------|---|
| Плотность нефтепродукта, кг/м <sup>3</sup> | 1014                          | 1935  |
|  | 1100                          | 3380  |
| Масса разлива, т                           | 1                             | 1024  |
|  | 10                            | 5074  |
| Скорость течения, м/с                      | 0,3                           | 616   |
|  | 1,5                           | 171   |
| Глубина водоема, м                         | 1                             | 2862  |
|  | 10                            | 2064  |
| Температура воды, °С                       | 0                             | 1518  |
|  | 25                            | 3360  |
| Атмосферное давление, Па                   | 87192                         | 2314  |
|  | 108257                        | 2250  |

В результате установлено, что размах вариации является существенным и изменяется в широком диапазоне, за исключением параметра атмосферное давление (см. табл. 1).

При формировании перечня сценариев численного моделирования применялся метод планирования эксперимента и дробный двухуровневый план Бокса и Хантера в математической системе STATISTICA 8.0 (табл. 2).

В качестве примера на рис. 1 – 3 приведены полученные конфигурации областей возможного погружения нефти для смоделированного в программном продукте FlowVision сценария разлива.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента для дробного двухуровневого плана Бокса и Хантера

| № | Плотность нефтепродукта, кг/м <sup>3</sup> | Глубина водоема, м | Скорость течения, м/с | Масса разлива, т | Температура воды, °С |
|---|--|--------------------|-----------------------|------------------|----------------------|
| 1 | 1014                                       | 1                  | 0,3                   | 1                | 25                   |
| 2 | 1100                                       | 1                  | 0,3                   | 1                | 0                    |
| 3 | 1014                                       | 10                 | 0,3                   | 1                | 0                    |
| 4 | 1100                                       | 10                 | 0,3                   | 1                | 25                   |
| 5 | 1014                                       | 1                  | 1,5                   | 1                | 0                    |
| 6 | 1100                                       | 1                  | 1,5                   | 1                | 25                   |

| №  | Плотность нефтепродукта, кг/м <sup>3</sup> | Глубина на водоёме, м | Скорость течения, м/с | Масса разлива, т | Температура воды, °С |
|----|--|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------------|
| 7  | 1014                                       | 10                    | 1,5                   | 1                | 25                   |
| 8  | 1100                                       | 10                    | 1,5                   | 1                | 0                    |
| 9  | 1014                                       | 1                     | 0,3                   | 10               | 0                    |
| 10 | 1100                                       | 1                     | 0,3                   | 10               | 25                   |
| 11 | 1014                                       | 10                    | 0,3                   | 10               | 25                   |
| 12 | 1100                                       | 10                    | 0,3                   | 10               | 0                    |
| 13 | 1014                                       | 1                     | 1,5                   | 10               | 25                   |
| 14 | 1100                                       | 1                     | 1,5                   | 10               | 0                    |
| 15 | 1014                                       | 10                    | 1,5                   | 10               | 0                    |
| 16 | 1100                                       | 10                    | 1,5                   | 10               | 25                   |

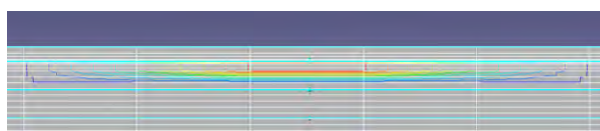


Рис. 1. Положение нефтяного пятна в момент разлива (вертикальный разрез)

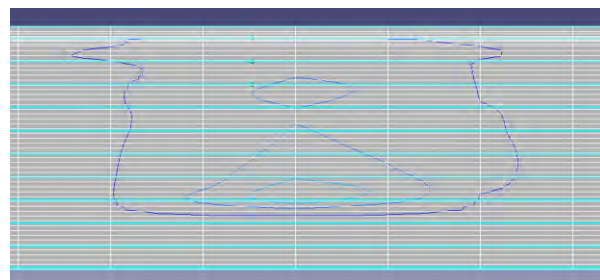


Рис. 2. Положение нефтяного пятна в объёме водотока (вертикальный разрез)

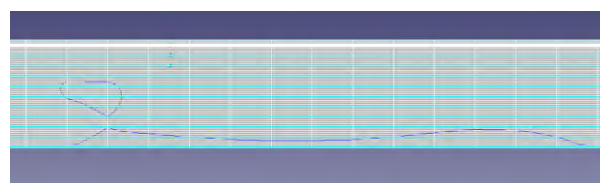


Рис. 3. Положение нефтяного пятна в момент достижения дна водоёма (вертикальный разрез)

### Результаты

При численном моделировании сценариев погружения нефти оценивались следующие параметры области загрязнения: время погружения, площадь, длина, ширина, координаты крайних точек. Результаты численного эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3

### Результаты численного эксперимента

| №  | Координата крайней правой точки, м | Координата крайней левой точки, м | Площадь, м <sup>2</sup> | Время погружения, с | Длина, м | Ширина, м |
|----|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------|----------|-----------|
| 1  | 5                                  | 24                                | 304                     | 54,3155             | 19       | 16        |
| 2  | 7                                  | 42                                | 1155                    | 98,2704             | 35       | 33        |
| 3  | -                                  | -                                 | 0                       | -                   | -        | -         |
| 4  | -6                                 | 15                                | 399                     | 77,0141             | 21       | 19        |
| 5  | 70                                 | 105                               | 450                     | 120,6510            | 30       | 15        |
| 6  | 110                                | 140                               | 840                     | 242,0310            | 30       | 28        |
| 7  | -                                  | -                                 | 0                       | -                   | -        | -         |
| 8  | -                                  | -                                 | 0                       | -                   | -        | -         |
| 9  | 19                                 | 62                                | 1892                    | 153,5160            | 43       | 44        |
| 10 | 67                                 | 117                               | 3100                    | 365,5520            | 50       | 62        |
| 11 | -24                                | 40                                | 3840                    | 172,4160            | 64       | 60        |
| 12 | -12                                | 49                                | 5124                    | 109,0790            | 61       | 84        |
| 13 | 109                                | 143                               | 1394                    | 342,0000            | 34       | 41        |
| 14 | -                                  | -                                 | 0                       | -                   | -        | -         |
| 15 | -14                                | 24                                | 1140                    | 136,3890            | 38       | 30        |
| 16 | -15                                | 30                                | 1935                    | 319,6700            | 45       | 43        |

При проведении численного эксперимента получен массив данных, достаточный для построения регрессионной модели оценки параметров области возможного погружения темных нефтепродуктов.

Далее методом факторно-регрессионного анализа в программе STATISTIKA выполнено построение уравнений связи, обеспечивающих расчет следующих параметров области загрязнения:

время погружения, координаты крайних точек, длины, ширины и площади:

Уравнения для оценки времени погружения, координаты крайних точек, длины, ширины и площади имеют вид:

$$t_{\text{п}} = 0,98\rho + 18,34M + 74,08v - 12,17H + 3,68T - 1019,15 \quad (1)$$

$$X_{л} = 0,189 \rho + 1,297 M + 36,44v - 8,436 H + 0,784 T - 182,476 \quad (2)$$

$$X_{п} = 0,24\rho + 3,47M + 32,223v - 8,14 H + 0,58T - 204,65 \quad (3)$$

$$L = 0,058\rho + 2,3056 M - 5v + 0,3056 H - 0,16T - 31 \quad (4)$$

$$B = 0,175\rho + 3,714M - 10,295v - 0,242 H - 0,159 T - 156,74 \quad (5)$$

$$S = 5,14\rho + 212,18M - 1047,4v + 45,88H - 10,26T - 4684,4 \quad (6)$$

где  $t_{п}$  – время погружения нефтепродуктов, с;  $X_{л}$ ,  $X_{п}$ ,  $L$ ,  $B$ ,  $S$  – параметры нефтяного пятна,

соответственно координаты крайних правой и левой точек пятна (м), длины (м), ширины (м) и площади (м<sup>2</sup>);  $\rho$  – плотность нефтепродукта, кг/м<sup>3</sup>;  $M$  – масса нефтепродукта, т;  $v$  – скорость течения, м/с;  $T$  – температура воды, °C;  $H$  – глубина, м.

### Обсуждение

Оценка качества полученного математического описания выполнена путем получения коэффициентов множественной корреляции, оценок параметров и построения карт Парето.

В качестве примера приведены данные для времени погружения (табл. 4 – 5, рис. 4).

Значения коэффициентов множественной корреляции превышают 0,8; абсолютная ошибка уравнений регрессии находится преимущественно в диапазоне от 5 до 25%, что свидетельствует о высокой степени адекватности полученных уравнений смоделированному процессу.

Таблица 4

Коэффициенты множественной корреляции

| Переменная     | SS модели и SS остатков |                             |                          |           |           |           |            |            |            |          |          |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|----------|----------|
|                | Множест. ст. R          | Множест. ст. R <sup>2</sup> | Скорр. кт R <sup>2</sup> | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F        | p        |
| Время всплытия | 0,973573                | 0,947844                    | 0,895688                 | 102121,9  | 5         | 20424,38  | 5619,354   | 5          | 1123,871   | 18,17325 | 0,003188 |

Таблица 5

Оценки параметров для времени погружения

| Показатель       | Стандартная ошибка | t       | p        | -95,00% Доверительный интервал | +95,00% Доверительный интервал | Бета     |
|------------------|--------------------|---------|----------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
| св.член          | 285,3865           | 3,57113 | 0,016024 | -1752,76                       | -285,544                       | -        |
| скорость течения | 18,8444            | 3,93134 | 0,011055 | 25,64                          | 122,525                        | 0,432111 |
| глубина          | 2,5126             | 4,84235 | 0,004705 | -18,63                         | -5,708                         | 0,532245 |
| температура воды | 0,8212             | 4,48359 | 0,006497 | 1,57                           | 5,793                          | 0,463098 |
| плотность        | 0,2629             | 3,71286 | 0,013814 | 0,30                           | 1,652                          | 0,422421 |
| масса            | 2,5126             | 7,29983 | 0,000755 | 11,88                          | 24,800                         | 0,830520 |

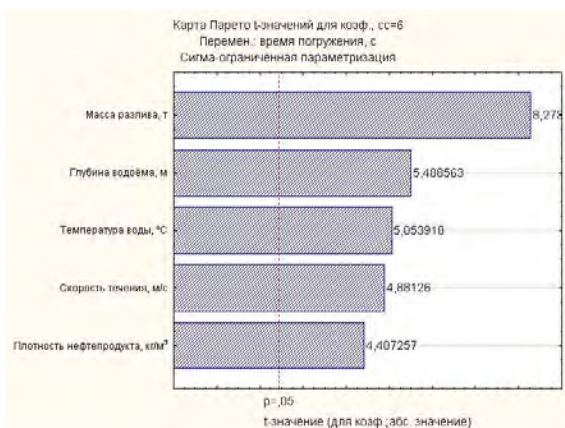


Рис. 4. Карта Парето для времени погружения

Анализ значимости факторов, входящих в состав уравнения связи (см. рис. 4), показал, что на время погружения наибольшее влияние оказывает масса разлива, глубина водоема и температура воды.

### Заключение

Путем совместного применения методов вычислительной гидродинамики и математической статистики выполнена разработка математической модели для оценки параметров области погружения, ориентированной на разлив темных нефтепродуктов с учетом температуры воды водоема, плотности нефтепродукта, массы разлива, скорости течения и глубины водотока.

Оценка качества разработанной регрессионной модели прогноза подводного движения разлива темных нефтепродуктов подтвердили возможность выполнения адекватного расчета параметров

области погружения нефти с одновременным учетом процессов растекания и перемещения под действием глубинных течений.

Полученные результаты необходимы для оценки вреда компонентам природной среды и разработки

мероприятий по локализации и ликвидации нефтяного загрязнения, возникающего при авариях судов.

#### Литература

1. Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков А.Н., Родина Н.С. Совершенствование прогнозирования разливов нефти от подводных источников. *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. Т. 1. № 2 (53). С. 106-117. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.016
2. Решняк В.И. Оценка уровня экологической опасности источников аварийных разливов нефти. Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 4 (97). С. 72-76. DOI: 10.34046/aumsuomt97/I3
3. Решняк В.И., Пластинин А.Е., Наумов В.С., Слюсарев А.С. Применение озона в процессах очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 4-2 (46). С. 168-173.
4. Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков В.С., Отделкин Н.С. Моделирование всплытия нефти от подводных источников в ледовых условиях. *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. № 4-2 (42). С. 87-91.
5. 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.
6. Решняк В.И., Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Отделкин Н.С. Экологическое обеспечение водного туризма. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 4-2 (46). С. 154-160.
7. Шматкова Е.Ю., Пластинин А.Е., Балденков А.П., Бородин А.Н. Оценка воздействия разливов нефти на экологически чувствительные районы в Печорском бассейне. В сборнике: *Великие реки - 2020. Труды 22-го международного научно-промышленного форума*. 2020. С. 18.
8. Y. Sun, X.W. Cao, F.C. Liang. Investigation on underwater spreading characteristics and migration law of oil leakage from damaged submarine pipelines. *Process. Saf. Environ. Prot.*, 127 (2019), pp. 329-347. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.030>
9. E. Arzaghi, R. Abbassi, V. Garaniya, J. Binns, F. Khan. An ecological risk assessment model for Arctic oil spills from a subsea pipeline. *Mar. Pollut. Bull.*, 135 (2018), pp. 1117-1127. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.030>.
10. R. Lardner, G. Zodiatisb. Modelling oil plumes from subsurface spills. *Marine Pollution Bulletin*. Volume 124, Issue 1, (2017), P. 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.07.018>
11. Gallego, A., O'Hara Murray, R., Berx, B., Turrell, W. R., Beegle-Krause, C. J., Inall, M., Sherwin, T., Siddorn, J., Wakelin, S., Vlasenko, V., Hole, L. R., Dagestad, K. F., Rees, J., Short, L., Rønningen, P., Main, C. E., Legrand, S., Gutierrez, T., Witte, U., & Mulanaphy, N. (2018). Current status of deepwater oil spill modelling in the Faroe-Shetland Channel, Northeast Atlantic, and future challenges. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 484-504. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.002>
12. Y. Li, H. Chen, and X. Lv, Impact of error in ocean dynamical background, on the transport of underwater spilled oil, *Ocean Model.*, 132, 30-45, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.10.003>
13. Zhu, H., You, J. and Zhao, H. (2017) An Experimental Investigation of Underwater Spread of Oil Spill in a Shear Flow. *Marine Pollution Bulletin*, 116, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.002>
14. Zhu, H., You, J. and Zhao, H. (2017) Underwater Spreading and Surface Drifting of Oil Spilled from A submarine Pipeline under the Combined Action of Wave and Current. *Applied Ocean Research*, 64, 217-235. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.03.007>
15. N. Kato, M. Choyekh, R. Dewantara, H. Senga, H. Chiba, E. Kobayashi, M. Yoshie, T. Tanaka, T. Short. An autonomous underwater robot for tracking and monitoring of subsea plumes after oil spills and gas leaks from seafloor. *J. Loss Prev. Process. Ind.*, 50 (2017), pp. 386-396. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.03.006>
16. H. Chen, W. An, Y. You, F. Lei, Y. Zhao, J. Li. Numerical study of underwater fate of oil spilled from deepwater blowout. *Ocean Engineering*, Volume 110, Part A, 2015, Pages 227-243, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.025>
17. X. Huang, S. Zhang, W. Xiao, J. Luo, B. Li, L. Wang, H. Xue, J. Gao. Flexible PDA@ACNTs decorated polymer nanofiber composite with superhydrophilicity and underwater superoleophobicity for efficient separation of oil-in-water emulsion. *J. Membr. Sci.*, 614 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118500>
18. H. Zhang, L. Yu, X. Ma, Y. Peng, J. Hu, S. Ruan. Self-cleaning poly(L-dopa)-based coatings with exceptional underwater oil repellency for crude oil/water separation. *Appl. Surf. Sci.*, 510 (2020), Article 145402. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145402>.

#### References

1. 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
2. Reshnyak V. I. Assessment of the level of environmental hazard of sources of emergency oil spills. Operation of maritime transport. 2020. № 4 (97). P. 72-76. DOI: 10.34046/aumsuomt97/I3
3. Valery I. Reshnyak, Andrey E. Plastinin, Viktor S. Naumov, Anatoly S. Slyusarev. The application of ozone in the processes of oil-containing bilge water purification. *Marine intellectual technologies*. 2019. № 4 V.2. pp. 168-173.



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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Y. Sun, X.W. Cao, F.C. Liang. Investigation on underwater spreading characteristics and migration law of oil leakage from damaged submarine pipelines. *Process. Saf. Environ. Prot.*, 127 (2019), pp. 329-347. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.030>
9. E. Arzaghi, R. Abbassi, V. Garaniya, J. Binns, F. Khan. An ecological risk assessment model for Arctic oil spills from a subsea pipeline. *Mar. Pollut. Bull.*, 135 (2018), pp. 1117-1127. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.030>.
10. R. Lardner, G. Zodiatis. Modelling oil plumes from subsurface spills. *Marine Pollution Bulletin*. Volume 124, Issue 1, (2017), P. 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.07.018>
11. Gallego, A., O'Hara Murray, R., Berx, B., Turrell, W. R., Beegle-Krause, C. J., Inall, M., Sherwin, T., Siddorn, J., Wakelin, S., Vlasenko, V., Hole, L. R., Dagestad, K. F., Rees, J., Short, L., Rønningen, P., Main, C. E., Legrand, S., Gutierrez, T., Witte, U., & Mulanaphy, N. (2018). Current status of deepwater oil spill modelling in the Faroe-Shetland Channel, Northeast Atlantic, and future challenges. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 484-504. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.002>
12. Y. Li, H. Chen, and X. Lv, Impact of error in ocean dynamical background, on the transport of underwater spilled oil, *Ocean Model.*, 132, 30–45, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.10.003>
13. Zhu, H., You, J. and Zhao, H. (2017) An Experimental Investigation of Underwater Spread of Oil Spill in a Shear Flow. *Marine Pollution Bulletin*, 116, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.002>
14. Zhu, H., You, J. and Zhao, H. (2017) Underwater Spreading and Surface Drifting of Oil Spilled from A submarine Pipeline under the Combined Action of Wave and Current. *Applied Ocean Research*, 64, 217-235. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.03.007>
15. N. Kato, M. Choyekh, R. Dewantara, H. Senga, H. Chiba, E. Kobayashi, M. Yoshie, T. Tanaka, T. Short. An autonomous underwater robot for tracking and monitoring of subsea plumes after oil spills and gas leaks from seafloor. *J. Loss Prev. Process. Ind.*, 50 (2017), pp. 386-396. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.03.006>
16. H. Chen, W. An, Y. You, F. Lei, Y. Zhao, J. Li. Numerical study of underwater fate of oil spilled from deepwater blowout. *Ocean Engineering*, Volume 110, Part A, 2015, Pages 227-243, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.025>
17. X. Huang, S. Zhang, W. Xiao, J. Luo, B. Li, L. Wang, H. Xue, J. Gao. Flexible PDA@ACNTs decorated polymer nanofiber composite with superhydrophilicity and underwater superoleophobicity for efficient separation of oil-in-water emulsion. *J. Membr. Sci.*, 614 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118500>
18. H. Zhang, L. Yu, X. Ma, Y. Peng, J. Hu, S. Ruan. Self-cleaning poly(L-dopa)-based coatings with exceptional underwater oil repellency for crude oil/water separation. *Appl. Surf. Sci.*, 510 (2020), Article 145402. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145402>.

#### 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

**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

**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

**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

**Александр Николаевич Каленков**, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf\_oospb@vsuwt.ru

**Aleksandr N. Kalenkov**, Ph.D. (Eng), Assistant professor 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

**Наталья Сергеевна Родина**, аспирант кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: rodina\_n\_s@mail.ru

**Natalia S. Rodina**, 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: rodina\_n\_s@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена после рецензирования 10.02.2022, принята к публикации 27.02.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved after reviewing 10.02.2022; accepted for publication 27.02.2022.

Научная статья

УДК 639.2.06/.09

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.027>

## Моделирование взаимодействия рыболовной системы с дальневосточной сардиной (иваси) и скумбрией

А.Н. Бойцов<sup>1</sup> boitsov\_an@mail.ru, Е.В. Осипов<sup>1</sup> oev@mail.ru, С.В. Лисиенко<sup>1</sup> lisienkosv@mail.ru,  
В.Е. Вальков<sup>1</sup> vlvalkov@yandex.ru, В.В. Баринов<sup>1</sup> fishery\_conf@mail.ru

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

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы, связанные с повышением эффективности промысла дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии путём учёта акустических полей рыболовных судов влияющих на поведение рассматриваемых гидробионтов. Приведены модель косяка рыбы и модель его взаимодействия с судном. Проведено численное моделирование косяков рыб при взаимодействии с акустическими полями двух типов рыболовных судов крупнотоннажного РТМС и среднетоннажного СТР-503 оснащёнными тралами. Результаты моделирования показали корреляцию с практикой промысла и позволили определить области концентрации косяков после прохождения их рыболовными судами. Показано, что небольшие тралы с оптимальными горизонтальными раскрытиями 70 м для облова косяков сардины иваси и скумбрии на крупнотоннажных судах позволяют увеличить уловистость, по сравнению с используемыми сегодня большими тралами имеющие горизонтальное раскрытие 130 м и более. Это достигается возможностью вывода тралов с оптимальным раскрытием за область концентрации гидробионтов после прохождения судна и воздействия его акустических полей на косяк. Соответственно небольшие тралы позволяют снизить затраты на топливо.

**Ключевые слова:** промышленное рыболовство, технология добычи, дальневосточная сардина (иваси), скумбрия, рыбопромысловый флот, управление промыслом

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального Агентства по рыболовству в рамках научно-исследовательской работы № 776/2021

**Для цитирования:** Бойцов А.Н., Осипов Е.В., Лисиенко С.В., Вальков В.Е., Баринов В.В. Моделирование взаимодействия рыболовной системы с дальневосточной сардиной (иваси) и скумбрией. Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 202—207

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.027>

## Modeling the interaction of the fishing system with the Japanese sardine (Iwashi) and mackerel

Anatoly N. Boytsov<sup>1</sup> boitsov\_an@mail.ru, Evgeniy V. Osipov<sup>1</sup> oev@mail.ru,  
Svetlana V. Lisienko<sup>1</sup> lisienkosv@mail.ru, Vladimir E. Valkov<sup>1</sup> vlvalkov@yandex.ru,  
Vasily V. Barinov<sup>1</sup> fishery\_conf@mail.ru

<sup>1</sup>Far Eastern State Technical Fisheries University

**Abstract.** The paper deals with issues related to increasing the efficiency of the Japanese sardine and mackerel fishing by taking into account the acoustic fields of fishing vessels that affect the behavior of the fish under consideration. A model of a school of fish and a model of its interaction with the vessel are given. Numerical modeling of fish shoals in interaction with acoustic fields of two types of fishing vessels of large-capacity RTMS and medium-capacity STR-503 equipped with trawls has been carried out. The simulation results showed a correlation with fishing practices and made it possible to determine the areas of concentration of shoals after they were passed by fishing vessels. It is shown that small trawls with optimal horizontal openings of 70 m for fishing shoals of sardine and mackerel on large-tonnage vessels can increase catchability compared to large trawls used today with a horizontal opening of 130 m or more. This is achieved by the possibility of moving trawls with optimal opening beyond the area of concentration of fish after the passage of the vessel and the impact of its acoustic fields on the school. Accordingly, small trawls can reduce fuel costs.

**Keywords:** Industrial fisheries, mining technology, Japanese sardine, mackerel, fishing fleet, fishery management.

**Financial Support:** The study was carried out with the financial support of the Federal Agency for Fisheries in the framework of research work No. 776/2021.

**For citation:** Anatoly N. Boytsov, Evgeniy V. Osipov, Svetlana V. Lisienko, Vladimir E. Valkov, Vasily V. Barinov, Modeling the interaction of the fishing system with the Japanese Sardine (Iwashi) and mackerel, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 202—207

### Введение

В связи с возобновлением промысла дальневосточной сардины иваси и скумбрии, рыболовным компаниям пришлось осваивать эти

объекты добычи после 25-летнего перерыва. Как показала практика промысла последних лет, у многих рыболовных компаний возникли проблемы, которые являются следствием отсутствия или утраты

навыков промысла дальневосточной сардины иваси и скумбрии, и сейчас идет процесс его накопления.

Поэтому целью данной работы является описание механизмов взаимодействия рыболовной системы (судно и орудие рыболовства) с гидробионтом, и получение технических и программных решений, которые позволят рыболовным компаниям успешнее осваивать промысел дальневосточной сардины иваси и скумбрии.

Промысел сардины иваси и скумбрии ведется в приповерхностном слое, где на поведение этих объектов оказывают существенное влияние акустические поля рыболовных судов. Поэтому при выработке тактики промысла необходимо учитывать акустические поля рыболовных судов.

Как показала практика, не многие рыболовные компании смогли эффективно использовать влияние акустических полей судов на поведение гидробионтов. Наиболее трудно приходится на кошельковом промысле, где объект лова находится в акустическом поле судна и его давление существенным образом влияет на поведение гидробионтов и может повлиять на выход их из зоны облова. При использовании траловых систем, судам приходится маневрировать, таким образом, чтобы дезориентировать гидробионтов, за счет изменения направленности акустического воздействия судна и обеспечить облов гидробионтов. Для траловых близнецовых систем (с двух судов), необходимо дополнительно учитывать курс косяка рыб и курс на него двух судов с их направленностью акустического поля.

Поэтому разработка моделей взаимодействия рыболовной системы с гидробионтом является актуальной проблемой на промысле дальневосточной сардины иваси и скумбрии.

### Материалы и методы исследования

Объектами исследования являются: рыболовная система (судно и орудие лова); гидробионты. Орудие лова – траловая система, а судно описывается его геометрическими параметрами и акустическим полем.

Данные по акустическим полям рыболовных судов взято из работы [1], а слуховые способности гидробионтов и их реакция на акустические поля из работ [1, 3, 4, 6 - 9, 12 - 14]. Форма, принимаемая орудиями рыболовства, рассчитывалась на основе моделей, изложенных в работах [10-11].

Рыболовные суда, осуществляющие промысел дальневосточной сардины иваси и скумбрии, делятся на среднетоннажные и крупнотоннажные. Результаты промысла за последние годы и расчеты с использованием работы [2] показали, что наиболее эффективными судами являются крупнотоннажные, которые осуществляют траловый промысел. Поэтому рассмотрим два типа судов РТМС, как основное крупнотоннажное судно и СТР-503 среднетоннажное.

Рыболовные суда излучают акустические шумы в широком диапазоне, однако при взаимодействии судна с гидробионтами нас интересуют шумы в диапазоне чувствительности рыб. Исследуемые объекты, дальневосточная сардина иваси (17-19 Дб) и скумбрия (30-35 Дб) слышат в полосе частот 1500 – 1800 Гц [3, 4].

На рис. 1 сведены показатели эквипотенциалей акустического поля судна РТМС в диапазоне чувствительности рассматриваемых гидробионтов, сигнал снимался на глубине 30 м при скорости судна 6 узл. [1]. Необходимо отметить, что глубины 0-40 м является основной областью обитания и облова дальневосточной сардины иваси и скумбрии. Суда типа РТМС наиболее распространены и поэтому пригодны для решения общих задач, выработки рекомендаций и моделей, однако при решении конкретных практических задач необходимо получать акустический портрет каждого судна, методика которого изложена в работах [1, 3].

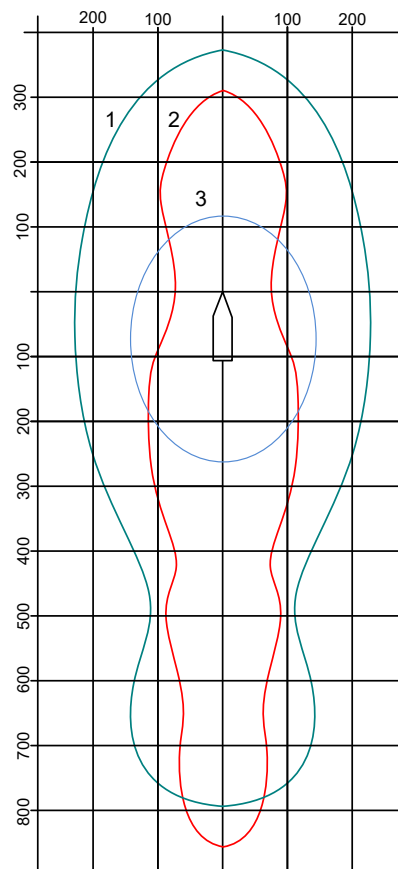


Рис. 1. Положения траловых систем в акустических полях судна: эквипотенциалы акустического поля судна: 1 – в диапазоне частот 0 – 500 Гц, 35 дБ; 2 – в полосе 1500 – 1800 Гц, 25 дБ, [1]; 3 – дистанция определения рыб на источник шума судна

Теперь опишем поведение дальневосточной сардины иваси и скумбрии в акустических полях судна. В обоих случаях для рассматриваемых гидробионтов при воздействии акустического поля в широком амплитудном диапазоне от 1 до 35 дБ, рыбы возбуждаются, происходит уплотнение косяка, это можно назвать первая область взаимодействия судна с объектом лова, для рассматриваемого судна можно легко определить.

При достижении порогового значения, которое определяется гидробионтом как шумовое поле выше фона, более 20 дБ, рыбы локализируют источник и начинают движение в противоположную сторону от источника. На промысле кошельковыми неводами для рассматриваемых рыб это происходит на дистанции в 120-135 м.

Эта дистанция зависит от дискретных составляющие судна с максимумом в области 10 – 12 Гц в инфразвуковом диапазоне, который характерен для рассматриваемых судов.

Максимальный диапазон, воспринимаемый рассматриваемыми гидробионтами, составляет 1500 – 1800 Гц. При этом учитывая, что рыба определяет направление на источник при одной длине волны, то расстояние на источник составит 150-125 м.

Как в первой, так и во второй области звуковое давление будет зависеть от скорости судна и сопутствующим этому работы всех элементов судна.

В третьей области воздействия судна на косяк происходит при непосредственном «наезде» на него. По мере продвижения судна, рыбы в косяке попадают в его ближнее акустическое поле, где происходит прямое воздействие звуковой волны судна на слуховые рецепторы рыб. Это воздействие равно четверти длины волны (при 100 Гц, длина волны составит 15 м). При этом в этой области рыбы с бросковой скоростью двигаются от борта судна.

На первом и втором этапе поведение рыб носит согласованный характер и фактически их поведение можно рассматривать как единое целое, только в третьей области каждый гидробионт в зоне ближнего акустического поля взаимодействует индивидуально.

Орудия рыболовства совместно с судном на промысле представляется единой системой, безусловно, само орудие рыболовства создает акустическое поле, которое характеризуется колебаниями канатных и сетных элементов орудий рыболовства, элементами их оснастки, для траловых систем это еще и доски. Однако на промысле рассматриваемых гидробионтов, учет отдельного влияния орудий рыболовства на поведение объекта лова без основного источника акустического воздействия на гидробионт не имеет смысла. Поэтому главная задача — это обеспечение орудием лова эффективного облова гидробионтов.

На траловом лове, как правило, гидробионты испытывают воздействие акустического поля судна во всех областях. Во время движения судна с тралом гидробионты обтекают судно и начинают сходить на значительном расстоянии от него, когда объект попадает во вторую область взаимодействия с судном, т.е. на расстояние 125 - 150 м.

При этом трал ограничивается горизонтальным и вертикальным раскрытием, которое определяется размерами скоплений гидробионтов, где у дальневосточной сардины иваси и скумбрии в работе [10] определено:

- вертикальное раскрытие  $H_C^Y = 50$  м;
- горизонтальное  $B_C^Y = 70$  м.

На промысле дальневосточной сардины иваси и скумбрии стоит еще и задача вывода трала в приповерхностный слой. Для классических траловых систем с досками имеются ограничения по возможности их настройки для работы в приповерхностном слое. Здесь есть еще особенность, что для каждого судна в зависимости от мощности подбирается трал и соответственно доски. Если мы возьмем и наложим расчеты формы траловой системы с двумя видами судов (рис. 3), то равновесное состояние траловой системы обеспечивается длиной ваера до 300 м для оптимального облова косяка. Если учесть, что длина

ваера, и голых концов трала (до 150 м, и в сумме с длиной ваера 450 м) не вполне обеспечивают эффективное обтекание гидробионтами акустического поля судна в диапазоне, при котором они его избегают. Поэтому сейчас на промысле используются траловые системы с горизонтальным раскрытием до 130 м, которые могут тянуть крупнотоннажные суда типа РТМС.

### Разработка моделей взаимодействия рыболовной системы и гидробионтов

**Модель косяка рыб.** Гидробионты образуют косяки рыб, эти косяки можно рассматривать как единый объект, но единое поведение складывается из поведения отдельной особи и взаимодействие особей в косяке. Отдельная особь в косяке опишем следующими параметрами (рис. 2): шумовое поле:  $Z_{КОМ}$  - область 1 (комфортное);  $Z_{КР}$  - область 2 (критическое),  $D_{ИСТ}$  - расстояние до источника шума (примем для наших объектов 125 м); расстояние между особями в косяке (рис. 4):  $D_{МИН}$  - минимальное, если любое расстояние между особями меньше  $D_{МИН}$ , то они расходятся;  $D_{КОМ}$  - комфортное;  $D_{МАК}$  - максимально, если любое расстояние между особями больше  $D_{МАК}$ , то они сходятся, здесь  $D_{МИН} < D_{КОМ} < D_{МАК}$ ; скорости гидробионтов  $C_{МИН}^P$  - минимальная;  $C_{КР}^P$  - крейсерская;  $C_{МАК}^P$  - максимальная, а  $T_{МАК}$  - длительность движения с максимальной скоростью, здесь  $C_{МИН}^P < C_{КОМ}^P < C_{МАК}^P$ ; координаты рыбы в пространстве  $x^P, y^P, z^P$ .

На основе данных работы [8] расстояние между особями примем:  $D_{МИН} < 0,2P_D$ ,  $D_{МАК} > 2P_D$ , где  $P_D$  - длина особи. Дистанция между двумя соседними особями найдем по формуле

$$D_p^2 = (x_1^p - x_2^p)^2 + (y_1^p - y_2^p)^2 + (z_1^p - z_2^p)^2. \quad (1)$$

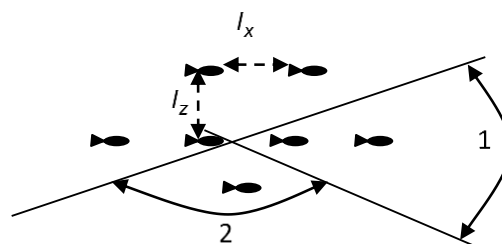


Рис. 2. Расстояние между особями в косяке: 1 – область бинокулярного зрения; 2 – область монокулярного зрения,  $l_z, l_x$  – расстояния между гидробионтами по оси  $z$ , по оси  $x$

В практике промысла в пределах промысловых операций время движения гидробионтов  $C_{МИН}^P, C_{КОМ}^P$  не ограничено. Продолжительность плавания гидробионтов с  $C_{МАК}^P$  составляет от 20 до 200 с [13], максимальную скорость рыб найдем по формуле [14]

$$C_{МАК}^P = aP_D + b, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, для исследуемых видов рыб  $a = 4$ ,  $b = 2,2$ .

Исследование поведения косяков [5, 8] при достижении гидробионтами  $D_{мин}$ ,  $D_{мак}$  показывает, что они двигаются всегда по горизонтали, а потом в вертикальном направлении. Это обусловлено статическим давлением, при этом максимальные скорости погружения составляют  $C_{мак,z+}^p = 0,5-0,7$  м/с, а скорость подъёма  $C_{мак,z-}^p = 0,5$  м/с [14].

Важным показателем нахождения рыбы в толще воды является температурный режим:  $T_{ком}$  – комфортная;  $T_{кр}$  – критическая.

**Модель судна.** Параметры судна опишем следующими параметрами: координаты  $(x_c, y_c)$ ; минимальная и максимальная скорость судна  $C_{мин}^c, C_{мак}^c$ ; данные о направленности звукового давления.

Значение  $D_{кр}^c$ , когда гидробионт будет избегать шумового поля судна (область 2)  $Z_{кр} \geq D_{кр}^c$ , которое определим по формуле

$$D_{кр}^c = kC, \quad (3)$$

где  $C$  – скорость судна,  $k$  – коэффициент шумового поля, зависящий от типа судна.

Соответственно в (3) можно легко учесть через  $k$  систему снижения шумов судна. В первом приближение для судна РТМС (рис. 1) будем использовать шаблон их эквипотенциалей акустических полей (полученные при максимальных скоростях при облове гидробионтов), приведенных к чувствительности рыб, и линейно их изменять до размера судна плюс 15 метров (3 область воздействия судна).

### Результаты

Моделирование косяка рыб проводилось с учетом того, что в начальный момент времени все рыбы располагаются в трехмерном массиве, на комфортной дистанции 0,25 м друг от друга.

Судно с тралом движется вдоль оси  $x$  со скоростью 6 узл., как источник шумового поля с учетом основных размеров корпуса судна. Для среднетоннажного судна производилось в первом приближение изменение масштаба акустических полей в соответствии с судном РТМС. Среднетоннажное судно бралось близкое по архитектуре СТР-503.

На рис. 3 показано движение косяка рыб 2, вид сверху (на глубине 5 м) и вид сбоку (сечение в плоскости ДП). Как можно заметить косяк в горизонтальном положении собирается в области 6 (500 - 550 м от судна), а на первоначальную глубину выходит в области 7 (650 - 700 м от судна).

Как можно заметить, трал с большим горизонтальным раскрытием дальше находится от судна, это позволяет разбитым косякам рыб увеличить концентрацию (рис. 3).

При этом часть элементов (траловые доски) находится за пределами области акустического шума судна, а поскольку доски являются источником акустического шума и как отмечено в ходе

исследований [8] влияют на увеличение концентрации рыб, то это стимулирует рыб лучше сконцентрироваться. Вследствие этого траловые системы с такими параметрами позволяют иметь уловы до 400 т. В тоже время оптимальные параметры тралов с учетом размеров скоплений  $B_c^y = 70$  м, имеют уловы до 130 т, что подходит для старых судов, но для новых судов с большими перерабатывающими мощностями этого недостаточно.

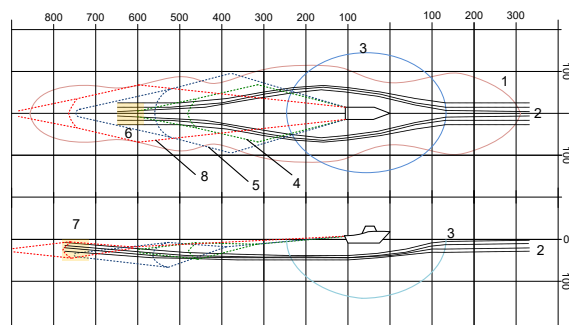


Рис.3. Положения траловых систем в акустических полях судна и движение косяка рыб: 1 (см. рис.1); 2 – движение косяка рыб; 3 – реакция косяка; 4 – трал с  $B_c^y = 70$  м, 5 – трал с  $B_c^y = 130$  м; 6 – область схождения косяка рыб в горизонтальной плоскости; 7 – область выхода косяка рыб на первоначальную глубину; 8 – трал с  $B_c^y = 70$  м на крупнотоннажном судне

Причина меньших уловов заключается в том, что такие траловые системы находятся на более близком расстоянии от судна и косяки не успевают сконцентрироваться полностью. При этом траловые доски находятся в шумовом поле судна и эффект их акустического воздействия для концентрации гидробионтов снижен.

Здесь необходимо добавить, что при проектировании рыболовных судов их эффективность будет зависеть напрямую от меньшего акустического поля.

### Заключение

Таким образом, исследования учета акустических полей судов на поведение дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии при промысле их тралами показало важность их учета в технике и тактике промысла. Представленные модели поведения гидробионта при воздействии на него рыболовной системы хорошо согласуется с результатами положения косяков относительно судна, приведенные в работе [8].

Проведенные исследования работы флота в 2019-2021 году показало, что наибольшей результативности добывались суда, имеющие большое горизонтальное раскрытие трала, что показывает положение косяка и трала 9 (рис. 3). Положение среднетоннажного судна с тралом 8 (рис. 3), показывает, что косяк, достаточно разрозненный в области захвата тралом и, следовательно, будет иметь небольшой улов. Однако на одном крупнотоннажном судне в 2020 и 2021 году руководствуясь рекомендациями [10], использовался трал с небольшим раскрытием. Это позволяло развить большую скорость, и равновесие траловой

системы достигалось при расстоянии от судна на 680-700 м. На данном судне были достигнуты наибольшие уловы при облове иваси и скумбрии. На рис. 3. показано моделирование крупнотоннажного судна с небольшим тралом 10 при взаимодействии с косяком, где видно, что уплотнение косяка происходит и по вертикали, и по горизонтали перед областью облова, в этом случае косяк будет обловлен полностью.

Результаты моделирования хорошо согласуются с практикой работы флота. Однако, затраты на буксировку больших траловых систем в 2-2,3 раза больше, чем оптимальных. Для эффективного решения этой задачи тралями с оптимальными

раскрытиями разработаны гибкие горизонтальные распорные системы ГДРУ [11]. Они в 15 раз легче траловых досок, имеют щиток в режиме всплытия, в результате равновесие траловой системы обеспечивается при расстоянии от судна до километра и более для среднетоннажных судов и крупнотоннажных судов при меньших скоростях и соответственно затратах. Это позволяет вывести траловую систему с оптимальными характеристиками из области акустических шумов судна, где эти шумы отрицательно влияют на поведение гидробионты, а следовательно, получать большие уловы.

### Литература

1. Кузнецов Ю.А., Кузнецов М.Ю. Обоснование и разработка методов и средств промысловой биоакустики/ Моногр. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2007. – 339 с.
2. Лисиенко С.В., Вальков В.Е., Иванко Н.С., Бойцов А.Н. Разработка математической модели и оптимизационной задачи по организации и управлению промысловым флотом при ведении добычи водных биологических ресурсов на примере промысла дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии в дальневосточном рыбохозяйственном бассейне. // Морские интеллектуальные технологии №4, 2019.
3. Кузнецов Ю.А., Баринов В.В., Кузнецов М.Ю., Осипов Е.В., Василистов А.В. Решение задач вычислительного эксперимента процессов тралового лова. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2012 – 68 с.
4. Fay R. R. What fish hear // Using sound to modify fish behavior at power-production and water-control facilities: a Workshop, Final Report. – 1997. - P. 77–90.
5. Гостомыслов Л.И. Способы замета кошелькового невода. – Владивосток: Дальиздат, 1977. – 43 с.
6. Касумян А.О. Структура и функция слуховой системы рыб. -М.: МГУ. – 2005. – 109 с.
7. Soria M., Freon P., Gerlotto F. Analysis of vessel influence on spatial behaviour of fish schools using a multi-beam sonar and consequences for biomass estimates by echo-sounder // ICES Journal of Marine Science. - 1996. - Vol. 53. – P. 453-458.
8. Коротков В.К. Реакции рыб на трал, технология их лова. - Калининград: МАРИНПО, 1998. - 398 с.
9. Шевченко А.И. Влияние конструкции тралов на характеристики изменения гидродинамического поля. // В кн.: Всесоюзное совещание: «Исследование и рациональное использование биоресурсов Дальневосточных и Северного морей и перспективы создания технических орудий для освоения неиспользуемых ресурсов открытого океана», Владивосток, 1985.
10. Габрюк В.И., Бойцов А.Н., Осипов Е.В. Методика определения горизонтального и вертикального раскрытия разноглубинных тралов. // Материалы V Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана» – Владивосток: Дальрыбвтуз, Т.1, 2018.- С 55- 65.
11. Бойцов А.Н., Осипов Е.В., Лисиенко С.В., Вальков В.Е., Пилипчук Д.А. Управление траловой системой с гибкими распорными устройствами. //Рыбное хозяйство, № 4, 2019. С 93-95.
12. He P., Wardle C.S. Endurance at intermediate swimming speeds of atlantic macrel, Scomber scombrus, herring, Clupea harengus and saithe, Pollachius virens // J. Fish Biol. – 1988. – Vol. 33. – P. 255-266.
13. Андреев Н.Н. К теории лова траллирующими орудиями лова. //Тр. ВНИРО. – 1977. – Т.122. – С. 58-76.
14. Честной В.Н. Динамика уловистости донных тралов. – М.: Пищ. Пром-сть, 1977. – 97 с.

### References

1. Kuznecov YU.A., Kuznecov M.YU. Obosnovanie i razrabotka metodov i sredstv promyslovoj bioakustiki [Justification and development of methods and means of commercial bioacoustics]/ Monogr. – Vladivostok: Dal'rybvvtuz, 2007. – 339 s.
2. Lisienko S.V., Val'kov V.E., Ivanko N.S., Bojcov A.N. Razrabotka matematicheskoy modeli i optimizacionnoj zadachi po organizacii i upravleniyu promyslovym flotom pri vedenii dobychi vodnyh biologicheskikh resursov na primere promysla dal'nevostochnoj sardiny (ivasi) i skumbrii v dal'nevostochnom rybohozyajstvennom bassejne. [Development of a mathematical model and an optimization problem for the organization and management of the fishing fleet in the extraction of aquatic biological resources by the example of the Far Eastern sardine (iwashi) and mackerel fishing in the Far Eastern fishery basin.]/ Morskije intellektual'nye tekhnologii №4, 2019.
3. Kuznecov YU.A., Barinov V.V., Kuznecov M.YU., Osipov E.V., Vasilistov A.V. Reshenie zadach vychislitel'nogo eksperimenta processov tralovogo lova. [Solving problems of computational experiment of trawl fishing processes] Vladivostok: Dal'rybvvtuz, 2012 – 68 s.
4. Fay R. R. What fish hear // Using sound to modify fish behavior at power-production and water-control facilities : a Workshop, Final Report. – 1997. - P. 77–90.
5. Gostomyslov L.I. Sposoby zameta koshel'kovogo neveda [Methods for sweeping a purse seine]. – Vladivostok: Dal'izdat, 1977. – 43 s.
6. Kasumyan A.O. Struktura i funkciya sluhovoj sistemy ryb [Structure and function of the auditory system of fish]- M.: MGU. – 2005. – 109 s.

7. Soria M., Freon P., Gerlotto F. Analysis of vessel influence on spatial behaviour of fish schools using a multi-beam sonar and consequences for biomass estimates by echo-sounder // ICES Journal of Marine Science. - 1996. - Vol. 53. - P. 453-458.
8. Korotkov V.K. Reakcii ryb na tral, tekhnologiya ih lova. [Fish reactions to trawl, fishing technology] - Kaliningrad: MARINPO, 1998. - 398 s.
9. Shevchenko A.I. Vliyaniye konstrukcii tralov na harakteristiki izmeneniya gidrodinamicheskogo polya. [Influence of the design of trawls on the characteristics of changes in the hydrodynamic field.] // V kn.: Vsesoyuznoye soveshchanie: «Issledovanie i racional'noye ispol'zovanie bioresursov Dal'nevostochnyh i Severnogo morej i perspektivy sozdaniya tekhnicheskikh orudij dlya osvoeniya neispol'zuemykh resursov otkrytogo okeana», Vladivostok, 1985.
10. Gabryuk V.I., Bojcov A.N., Osipov E.V. Metodika opredeleniya gorizontalnogo i vertikal'nogo raskrytiya raznoglubinnyh tralov. [Methodology for determining the horizontal and vertical opening of midwater trawls]// Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Aktual'nye problemy osvoeniya biologicheskikh resursov Mirovogo okeana» – Vladivostok: Dal'rybvuz, T.I, 2018.- S 55- 65.
11. Bojcov A.N., Osipov E.V., Lisienko S.V., Val'kov V.E., Pilipchuk D.A. Upravlenie tralovoj sistemoj s gibkimi raspornymi ustrojstvami. [Trawl system control with flexible spacers.]//Rybnoe hozyajstvo, № 4, 2019. S 93-95.
12. He P., Wardle C.S. Endurance at intermediate swimming speeds of atlantic macrel, *Scomber scombrus*, herring, *Clupea harengus* and saithe, *Pollachius virens* // J. Fish Biol. – 1988. – Vol. 33. – P. 255-266.
13. Andreev N.N. K teorii lova traliruyushchimi orudiyami lova. [Towards the theory of trawling fishing gear]//Tr. VNIRO. – 1977. – T.122. – S. 58-76.
14. Chestnoj V.N. Dinamika ulovistosti donnyh tralov.[Catch dynamics of bottom trawls] – M.: Pishch. Prom-st', 1977. – 97 s.

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

**Анатолий Николаевич Бойцов**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52 Б, e-mail: boitsov\_an@mail.ru

**Anatoly N. Boytsov**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Industrial Fisheries, Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B, e-mail: boitsov\_an@mail.ru

**Евгений Валериевич Осипов**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52 Б, e-mail: oev@mail.ru

**Evgeniy V. Osipov**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Industrial Fisheries, Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B, e-mail: oev@mail.ru

**Светлана Владимировна Лисиенко**, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой Промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52 Б, e-mail: lisienkosv@mail.ru

**Svetlana V. Lisienko**, Ph.D. (Econ), Associate Professor, Head of the Chair of Industrial Fisheries Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B, e-mail: lisienkosv@mail.ru

**Владимир Евгеньевич Вальков**, аспирант кафедры Промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52 Б, e-mail: vlvalkov@yandex.ru

**Vladimir E. Valkov**, Graduate student of the Chair of Industrial Fisheries Far Eastern State Technical Fisheries University, 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B, e-mail: vlvalkov@yandex.ru

**Василий Владимирович Баринов**, кандидат технических наук, доцент кафедры Промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52 Б, e-mail: fishery\_conf@mail.ru

**Vasily V. Barinov**, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Chair of Industrial Fisheries, Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B, e-mail: fishery\_conf@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.11.2021; одобрена после рецензирования 20.01.2022, принята к публикации 21.02.2022

The article was submitted 17.11.2021; approved after reviewing 20.01.2022; accepted for publication 21.02.2022.



Научная статья

УДК 621.372

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.028>

## Метод гидроакустической связи

С.Н. Павликов<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,  
А.Н. Крючков<sup>2</sup> kruchkov@mail.ru

<sup>1</sup>Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского

<sup>2</sup>Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени адмирала С.О. Макарова.

**Аннотация.** Развитие инфокоммуникационных систем требует повышения эффективности использования акустических методов. Однако, совершенствование гидроакустической связи связано с высокой нелинейностью и нестационарностью канала. Происходит раскоорреляция сигнала за счет трансформации в пространстве и во времени. Приемник не видит ожидаемого сигнала с заданными параметрами. Морских интеллектуальных систем кроме радиоволн могут и должны использовать гидроакустические сигналы. В работе предлагается новый способ гидроакустической связи, учитывающий высокие требования к мобильности и пропускной способности инфокоммуникационных технологий морских интеллектуальных систем. Целью работы является повышение качества гидроакустической связи путем тестирования канала и передачи части функций обработки в среду распространения. Актуальность связана с возрастанием требований по увеличению пропускной способности морских интеллектуальных систем между абонентами включая и гидроакустические каналы. Но для этого нужна новая технология, приведенная в данной работе и основанная на повышении помехозащищенности при увеличении допустимых скоростей взаимного перемещения путем увеличения коэффициента взаимной корреляции прошедшего канал и ожидаемого сигнала. Метод решения поставленных задач основан на анализе развития и прогнозировании технологий звукоподводной связи. Новизна заключается в использовании мониторинга передаточной характеристики гидроакустического канала между абонентами с использованием специальных сигналов и методов их обработки. Основные выводы: при незначительных изменениях процессов метода гидроакустического обмена информацией между легитимными абонентами достигнуто повышение качества связи.

**Ключевые слова:** гидроакустика, связь, качество, метод, трансформация сигнала, обработка.

**Для цитирования:** Павликов С.Н., Копаева Е.Ю., Колесов Ю.Ю., Петров П.Н., Крючков А.Н. Метод гидроакустической связи. Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 208—214

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.028>

## Hydroacoustic communication method

Sergey N. Pavlikov<sup>1</sup> psn1953@mail.ru, Ekaterina Yu. Kopaeva<sup>1</sup> katya.kopaeva.97@mail.ru,  
Yuriy Yu. Kolesov<sup>1</sup> kolesov\_jr@mail.ru, Pavel N. Petrov<sup>1</sup> PavelNikol97@gmail.com,  
Andrey N. Kryuchkov<sup>2</sup> kruchkov@mail.ru

<sup>1</sup>Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelsky Russia, <sup>2</sup> Pacific Higher Naval School named after Admiral S.O. Makarov. Vladivostok, Russia

**Abstract.** The development of infocommunication systems requires an increase in the efficiency of the use of acoustic methods. However, the improvement of hydroacoustic communication is associated with high nonlinearity and non-stationarity of the channel. There is a decoherence of the signal due to transformation in space and time. The receiver does not see the expected signal with the specified parameters. Marine intelligent systems can and should use sonar signals in addition to radio waves. Vessels, except for research and fishing, do not use hydroacoustics to solve telecommunications problems. The paper proposes a new method of hydroacoustic communication, taking into account the high requirements for mobility and bandwidth of infocommunication technologies of marine intelligent systems. The aim of the work is to improve the quality of hydroacoustic communication by testing the channel and transferring part of the processing functions to the distribution environment. Relevance is associated with the increasing requirements for increasing the capacity of marine intelligent systems between subscribers, including sonar channels. But this requires a new technology, given in this work and based on increasing noise immunity while increasing the permissible speeds of mutual movement by increasing the coefficient of mutual correlation of the past channel and the expected signal. The method of solving the tasks is based on the analysis of the development and forecasting of sound-submarine communication technologies. The novelty lies in the use of monitoring the transfer characteristics of the sonar channel between subscribers using special signals and methods of their processing. The main conclusions: with minor changes in the processes of the method of hydroacoustic exchange of information between legitimate subscribers, an increase in the quality of communication has been achieved.

**Keywords:** hydroacoustics, communication, quality, method, signal transformation, processing.

**For citation:** Sergey N. Pavlikov, Ekaterina Yu. Kopaeva, Yuriy Yu. Kolesov, Pavel N. Petrov, Andrey N. Kryuchkov. Hydroacoustic communication method. Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 208—214

## Введение

Развитие инфокоммуникационных систем (ИКС) требует повышения эффективности использования акустических методов. Однако, совершенствование гидроакустической связи (ГС) связано с высокой нестационарностью канала. Происходит раскоорреляция сигнала за счет трансформации в пространстве и во времени. Приемник не видит ожидаемого сигнала с заданными параметрами. Доплеровский эффект значительно превышает уровень деформации по сравнению с аналогичным преобразованием радиосигналов. Морские интеллектуальные системы (МИС) кроме радиоволн могут получить дальнейшее развитие за счет использования гидроакустических каналов. Известно что моря и океаны занимают значительные объемы на планете и могут повысить качество ИКС. Предлагается улучшить способ ГС, учитывающий возросшие требования к мониторингу параметров каналов. Целью работы является повышение качества ГС путем тестирования канала и передачи части функций обработки в среду распространения. Актуальность связана с возрастанием требований по увеличению пропускной способности МИС между абонентами включая и гидроакустические каналы. Но для этого нужна новая технология, приведенная в данной работе и основанная на повышении помехозащищенности при увеличении допустимых скоростей взаимного перемещения путем увеличения коэффициента взаимной корреляции прошедшего канал и ожидаемого сигнала. Объектом исследования является система ГС, предметом - способ ГС. Критерием эффективности - повышение качества ГС. Для достижения которого в известный способ ГС добавлены процедуры: формирования сигналов с возможностью тестирования канала и передачи этой информации по обратному каналу на передающую сторону (инициатора информационного обмена) для предварительной корректировки (обработки) планируемой для передачи информации, внесенная корректировка переданного сигнала компенсируется передаточной характеристикой канала. Легитимный абонент получает сигнал с ожидаемыми параметрами. Его согласованный фильтр позволяет повысить отклик не менее чем на три порядка, в зависимости от учета других факторов: скорости взаимного перемещения, тип вертикального распределения скорости звука в районе, частотного диапазона, скорости передачи, затухания и др. Метод решения поставленных задач основан на анализе развития и прогнозировании технологий звукоподводной связи и прогнозированию искажений сигнала в канале. Новизна заключается в использовании мониторинга параметров среды: характеристики района плавания, вертикального и горизонтального распределений скорости звука (ВГРСЗ), передаточной характеристики гидроакустического канала между абонентами. Для этого предложен и исследован специальный сигнал инвариантный к Доплеру и метод обработки. Основные выводы: при незначительных изменениях процессов метода гидроакустического обмена информацией между легитимными абонентами достигнуто повышение качества связи.

## 1. Анализ технологий

В работах [1 - 3] приведены результаты анализа существующих и тенденции развития ГС, среди них применение широкополосных сигналов, прогнозирование многолучевых трасс и искажений, применение методов адаптации и др.

В современных системах связи обычно используется частотный дуплекс, и применяются достаточно широкополосные сигналы, поэтому устранение взаимного влияния сигналов в прямом и обратном каналах требует обеспечения значительного частотного разнеса между этими каналами. Указанные факторы исключают практическую реализацию способа Retransmission Diversity [3]. Для многолучевых каналов связи известно техническое решение [4], заключающееся в том, что предназначенный для передачи информационный сигнал перед искажается таким образом, чтобы скомпенсировать его искажения в многолучевом канале. В результате принимаемый сигнал является однолучевым и обрабатывается простым однолучевым приемником. Это особенно актуально для прямого канала, поскольку на абонентской станции не требуется использование сложного в реализации многолучевого приемника. Для реализации указанного способа передачи сигнала на передающей стороне необходима оценка канала распространения, а для её получения используется временной дуплекс [4].

В описании [5], техническим решением (ТР) является метод когерентной разнесенной передачи сигнала, который содержит на передающей стороне операции формирования  $N$  каналов разнесения и  $N$  пилот-сигналов и назначают каждому каналу разнесения свой пилот-сигнал, передают сигнал через все каналы разнесения, а пилот-сигналы - по соответствующим каналам разнесения, на приемной стороне оценивают передаточные функции каналов разнесения с использованием переданных пилот-сигналов, передают результаты оценки передаточных функций каналов разнесения на передающую сторону, на передающей стороне в соответствии с полученными результатами оценок осуществляют предискажения информационного сигнала, передаваемого через каждый канал разнесения таким образом, чтобы максимизировать качество приема информационного сигнала на приемной стороне.

Методу [5], характеризуется недостатки:

- операция предискажения информационного сигнала проводится по пилот-сигналам, что приводит к увеличению ошибки в прогнозе передаточной функции канала, т.к. информационный сигнал и пилот-сигналы по п. 5 формулы [5], «полоса частот разделяется между узкополосными пилот-сигналами различных каналов разнесения и информационным сигналом»;

- вычисление передаточной функции требует дополнительных вычислительных и других ресурсов.

Все существующие в настоящее время способы оценки и учёта импульсной характеристики (ИХ) в системах радиосвязи имеют общее фундаментальное ограничение – они позволяют достигать заявленного положительного эффекта лишь в рамках соблюдения дисперсионного соотношения, т.е. для узкополосных сигналов, у которых отношение ширины спектра к несущей

(средней для ЧМ и ФМ сигналов) частоте меньше единицы [6].

Задача, на решение которой направлена данная работа – повышение эффективности передачи информации в системе многоканальной связи с применением широкополосных гидроакустических сигналов.

В работе приведено решение аналогичной задачи для радиоканала [7]. Отклик линейной системы на единичный импульс  $\delta(t)$  называется импульсной характеристикой (ИХ)  $h(t)$  системы, а выходной сигнал  $S_{\text{вых}}(t)$  можно представить сверткой ИХ системы  $h(t)$  с функцией описывающей входной сигнал  $S_{\text{вх}}(t)$

$$S_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{вх}}(\tau)h(t-\tau)d\tau. \quad (1)$$

Отметим, что частотное представление  $H(\omega)$  импульсного отклика  $h(t)$  системы (или соответствующей операции) имеет смысл частотной передаточной функции (ЧПФ) системы и позволяет определить сигнал на выходе системы (в частотной форме представления) при задании произвольного сигнала (в частотной форме) на ее входе. По существу, ЧПФ  $H(\omega)$  представляет собой распределение по частоте коэффициентов пропускания частотных составляющих сигнала с входа на выход системы.

Для определения ИХ  $h(t)$  канала передачи необходимо использовать в качестве зондирующего сигнала единичный импульс. То есть, автокорреляционная функция сигнала должна иметь, по возможности, узкий центральный пик и малые боковые лепестки, равномерно распределенные во времени. Оценка может быть осуществлена в спектральной области путем применения сигнала со спектром  $\delta$ -импульса:

$$F\{\delta(\tau)\} = 1$$

Энергетический спектр сигнала вида:

$$S_M(t) = e^{j\Omega \ln(t-\tau)} \cdot (t-\tau)^{-\gamma} = (t-\tau)^{j\Omega-\gamma}, \quad (2)$$

при  $\gamma = 1$  практически совпадает со спектром  $\delta$ -функции [6, 7].

Отклик канала распространения на сигнал (2) при  $\gamma = 1$ , может быть представлен как

$$S_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)(t-\tau)^{j\Omega-1} d\tau. \quad (3)$$

Так как входной сигнал (2) соответствует единичному импульсу, отклик системы представляет собой импульсную характеристику  $h(t)$  данной системы, а результатом инверсной свертки отклика системы  $h(t)$  с входным сигналом  $S_M(t)$  будет единичный импульс

$$\delta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_M(\tau)h(t-\tau)d\tau. \quad (4)$$

Таким образом, излучение сигнала

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{T}\right) \sin(\Omega \ln(t-\tau_i))(t-\tau_i)^{-1}, \quad (5)$$

где  $\tau_i = \text{const}$ , параметр определяющий объем ансамбля ортогональных сигналов;

$i = 1 \dots N$  – номер канала разнесения.

$\Omega$  – начальная частота ( $\omega(t) = \Omega/(t-\tau)$ );

$T$  – аддитивная длительность сигнала, позволит выполнять обработку (сжатие) информации непосредственно в радиоканале распространения. Математические модели сигнала и метода обработки свободны от физической реализации, но применение технологии [8] не позволит получить ожидаемого результата за счет высокой степени нелинейности гидроакустического канала [9- 11].

Одним из ТР, позволяющим продвинуться в данном направлении, является метод ГС [12]. ТР включает следующие операции гидроакустической аппаратуры связи (ГААС) двух мобильных носителей:

- передачу по гидроакустическому каналу первой ГААС запроса на передачу сообщения с указанием в запросе условного номера второй ГААС;
- прием второй ГААС запроса от первой ГААС на установление гидроакустической связи;
- передачу по гидроакустическому каналу второй ГААС первой ГААС подтверждения о готовности к приему сообщения;
- прием этого подтверждения первой ГААС;
- передачу по гидроакустическому каналу первой ГААС сообщения второй ГААС;
- при этом запрос на передачу сообщения первой ГААС посылает с использованием ненаправленной излучающей антенны;
- прием запроса на передачу сообщения второй ГААС осуществляет с использованием направленной приемно-излучающей антенны с одновременным определением направления прихода запроса;
- передачу подтверждения готовности к приему сообщения вторая ГААС посылает с использованием направленной приемно-излучающей антенны по направлению, с которого получен запрос на передачу сообщения;
- прием от второй ГААС подтверждения готовности к приему сообщения первой ГААС осуществляется с использованием направленной приемно-излучающей антенны с одновременным определением направления прихода подтверждения;
- сообщение первая ГААС посылает второй ГААС с использованием направленной приемно-излучающей антенны по направлению, с которого пришло подтверждение готовности к приему сообщения;
- сообщение вторая ГААС принимает с использованием направленной приемно-излучающей антенны с направления, с которого получен запрос на передачу сообщения.

Однако данный метод применим только в условиях сплошной акустической освещенности [12]. Известно, что ВГРСЗ усложняет процесс и приводит к возможности потери энергетического контакта за счет перехода мобильных носителей ГААС в зону тени.

В описании патента [13] приведено ТР позволяющее дистанционно оперативно измерять

ВРСЗ, а значит и ГРСЗ и использовать для прогноза зон освещенности и теней.

Вторым недостатком [12] является отсутствие действий в случае потери контакта, что обусловлено высокой неопределенностью взаимного расположения ГААС с привязкой к лучевым картинкам и зонам освещенности и тени, а также динамики перемещения, а значит отсутствия механизма прогнозирования и действий по восстановлению энергетического контакта.

Каждый луч распространения сигнала проходит свой путь с различными параметрами трассы: длины, количества и качества переотражений от границ канала и слоя скачка ВРСЗ, а значит, ИХ и ЧПФ будут отличаться. Что и было учтено в предлагаемом методе.

## 2. Предлагаемое техническое решение

Алгоритм работы метода приведен на рисунке 1 и включает следующие операции на сторонах обеих ГААС:

1. Анализ исходных данных на сеанс звукоподводной связи в заданном районе, ожидаемых глубинах движения и параметров движения ГААС, сбор недостающей информации: ГААС измеряют ВГРСЗ;

2. Построение зон акустической освещенности и теней, нанесение трасс движения своего носителя ГААС и ГААС второго абонента;

3. Прогноз наличия энергетического контакта и параметров его продолжительности на необходимое время сеанса с учетом возможных вариантов взаимного перемещения, определение оптимальных углов излучения и приема сигналов в процессе сеанса связи;

4. Анализ ГААС противной стороны и динамика их перемещения относительно границ района планируемого проведения сеанса связи;

5. Выбор варианта проведения сеанса связи: каждому каналу (из множества каналов – многоканальный режим) разнесения назначается свой сигнал по пространственному углу излучения, форме сигнала, частотному диапазону и др.;

6. Многоканальная передача по углу в горизонтальной и вертикальной плоскостях в заданной полусфере, например с границы зоны планируемого сеанса в сторону зоны, гидроакустического сигнала вида (5) с оговоренными заранее параметрами от первой ГААС запроса на передачу сообщения с указанием в запросе условного номера второй ГААС, своего местоположения и планируемой динамики движения по курсу, глубине и скорости;

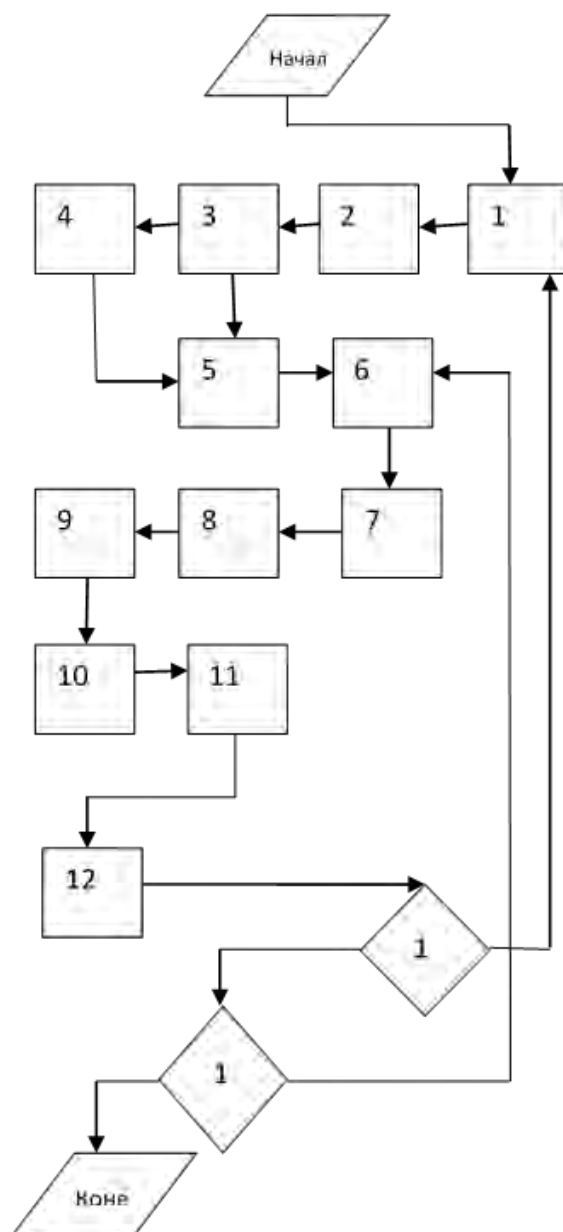


Рис. 1

7. Многоканальный направленный прием второй ГААС запросов от первой ГААС на установление гидроакустической связи, с определением углов максимального уровня прихода сигнала (например запроса), установления легитимности второй ГААС и условий соблюдения требований к сеансу, например отсутствия ГААС нелегитимного абонента;

8. На второй приемной стороне ГААС из сигналов каналов разнесения после выполнения предискажения, путем операции инверсии, составляют алфавит, из элементов которого формируют по правилу, оговоренному сторонами, сообщение от источника информации второй ГААС первой ГААС;

9. Передают по гидроакустическому каналу от второй ГААС первой ГААС информацию, например подтверждение о готовности к приему сообщения, с указанием своего местоположения относительно ВГРСЗ и планируемой динамики движения по курсу, глубине и скорости, а также предпочтительных параметров проведения сеанса связи: формы и параметров сигналов, направленности для излучения и приема сигналов, кроме того, производит передачу инверсного принятого сигнала;

10. Проводят направленный многоканальный прием первой ГААС сигналов от второй ГААС, которые являются элементами алфавита, из которых по оговоренному сторонами правилу восстанавливают сообщение для потребителя информации на первой ГААС. При этом, принятые сигналы после выполнения предсказания, путем операции инверсии, используют как актуализированный алфавит для формирования по правилу, оговоренному сторонами, сообщения от источника информации первой ГААС второй ГААС;

11. Передача по гидроакустическому каналу первой ГААС сообщения второй ГААС с использованием направленной излучающей антенны;

12. Прием сообщения второй ГААС осуществляет с использованием направленной приемно-излучающей антенны с одновременным определением направления прихода запроса, при этом принятые сигналы являются элементами алфавита, из которых по правилу, оговоренному сторонами ГААС, восстанавливается сообщение и передается потребителю информации на второй ГААС;

13. В случае потери контакта ГААС инициатор сеанса анализирует условия потери контакта и осуществляет переход к п.1 алгоритма. Для восстановления контакта могут быть использованы известные приемы повышения отношения сигнал/помеха (ОСП), например мощности излучения, снижения скорости перемещения для уменьшения уровня собственных помех, скорости передачи сигналов и др.;

14. Обновление алфавита происходит постоянно в процессе обмена информацией между ГААС до окончания сеанса связи;

Таким образом, стороны ведут мониторинг параметров среды, сигналов от абонентов, с которыми имеются оговоренные правила обработки, и формирование или обновление алфавита, это

происходит постоянно в процессе обмена информацией между сторонами. Что не доступно для противной стороны.

### 3. Оценка эффективности

Реализация данного ТР позволит получить следующие результаты:

1. Повысить эффективности использования гидроакустических каналов связи при  $ОСП=0,7$ , коэффициент взаимной корреляции  $10^4$ ;

2. Применение сигнала инвариантного доплеровскому преобразованию повышает пропускной способности за счет отсутствия необходимости пилот-сигнала и сохранение работоспособности метода на максимальных для среды скоростях относительного перемещения;

3. Защищенность информации повышается за счет адаптации трасс сеанса связи и динамически меняющегося алфавита под особенности канала. Импульсная характеристик от точки к точке меняется, что затрудняет нелегитимному абоненту снять информацию в канале;

4. Скрытность сеанса связи возрастает благодаря оперативному дистанционному измерению ВГРСЗ и определения зон освещенности и зон теней, что позволяет обоснованно принять решение о выборе углов излучения сигналов.

### Выводы

1. Новизна заключается в использовании мониторинга передаточной характеристики гидроакустического канала между абонентами с использованием специальных сигналов и методов их обработки.

2. При незначительных изменениях процессов метода гидроакустического обмена информацией между легитимными абонентами достигнуто повышение качества связи:

- повышена мобильность (допустимая скорость относительного перемещения) применения метода;
- повышена помехозащищенность связи;
- повышена защищенность информации в канале распространения.

Таким образом, цель достигнута. Продолжением работы является построение методики адаптации параметров сигналов абонентов для решения последовательных этапов задач с оптимальным применением ресурсов.

### Литература

1. Боккер П. Передача данных: Техника связи в системах телеобработки данных. В 2-х томах. Том 2. Устройства и системы: Пер. с нем./Под ред. Д. Д. Кловского. - М.: Радио и связь, 1981. - 256 с.
2. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи.- М.: ЭКО ТРЕНДЗ. 1998.- 239 с.
3. Microwave Mobile Communications/Edited by William C. Jakes. IEEE Press. NY, 1994.
4. "Pre-RAKE diversity combining in time division duplex CDMA mobile communications", IEEE, 1995 г., 0-7803-3002-1/95 431-435.
5. Пат. РФ № 2192094, Способ когерентной разнесенной передачи сигнала / Гармонов А.В. дата Заявл. 2001103479/09, 05.02.2001. Оpubл. 27.10.2002.
6. Мочалов А.В., Павликов С.Н., Убанкин Е.И. Новые направления в развитии телекоммуникационных систем. – Владивосток: ВГУЭС, 2016. - 106 с. (ISBN-978-5-9736-0369-4).
7. Павликов С.Н., Убанкин Е.И. Когерентная обработка сигнала в канале распространения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 4. С. 48-55. doi:10.24411/2409.5419.2018-10278.
8. Пат. РФ №2713750. Способ когерентной разнесенной передачи сигнала/ Павликов С.Н., Убанкин Е.И. Заявл.30.10.2019. Оpubл. 07.02.2020, Бюл. №4
9. Зарайский В.А., Тюрин А.М. Теория гидролокации. Л.: ВМА, 1975. 605 с.

10. Ремли В.Р. Влияние доплеровской дисперсии на обнаружение и разрешающую способность при использовании согласованных фильтров. // ТИИЭР. 1966. - Т. 54. N 1.- С. 39-46.
11. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. М.: Сов. Радио, 1971. 568 с.
12. Пат. РФ №2713750. Способ осуществления гидроакустической связи между автономными аппаратами/ Колесников М.П., Машонин А.И., Пашкевич И.В., Смирнов А.С. Заявл.30.10.2019. Оpubл.22.06.2020. Бюл. №18.
13. Пат. РФ №2066852. Способ определения распределения скорости звука в жидких средах в зависимости от глубины./Павликов С.Н.. Заявл. 28.05.1883., Оpubл. 20.09.1996.

#### References

1. Bokker P. Data transmission: Communication techniques in teleprocessing systems. In 2 volumes. Volume 2. Devices and systems: Lane. with German/Ed. by D. D. Closky. - M.: Radio i svyaz', 1981. - 256 p. (In Rus).
2. Gromakov Yu.A. Standards and systems of mobile radio communication.- M.: ECO TRENDS. 1998.- 239 p. (In Rus).
3. Microwave Mobile Communications/Edited by William C. Jakes. IEEE Press. NY, 1994.
4. "Pre-RAKE diversity combining in time division duplex CDMA mobile communications", IEEE, 1995, 0-7803-3002-1/95 Pp. 431-435.
5. Pat.. RF No 2192094, Method of coherent spaced signal transmission / Garmonov A.V. date Requested. 2001103479/09, 05.02.2001. Publ. 27.10.2002.
6. Mochalov A.V., Pavlikov S.N., Ubankin E.I. New directions in the development of telecommunication systems. – Vladivostok: VSUES, 2016. - 106 p. (ISBN-978-5-9736-0369-4). (In Rus).
7. Pavlikov S.N., Ubankin E.I. Coherent signal processing in the propagation channel // Nauko-intensive technologies in space research of the Earth. 2019. T. 11. № 4. Pp. 48-55. doi:10.24411/2409.5419.2018-10278. (In Rus).
8. Pat. RF No. 2713750. Method of coherent distributed signal transmission / Pavlikov S.N., Ubankin E.I. Applied.30.10.2019. Publ. 07.02.2020, Bl. No4. (In Rus).
9. Zaraysky V.A., Tyurin A.M. Theory of sonar. L.: VMA, 1975. 605 p. (In Rus).
10. Remley V.P. Influence of Doppler dispersion on detection and resolution when using consistent filters. TIIEP. 1966. - T. 54. No. 1.- Pp. 39-46. (In Rus).
11. Cook C., Bernfeld M. Radar signals. M.: Sov. Radio, 1971. 568 p. (In Rus).
12. Pat. RF No. 2713750. Method of hydroacoustic communication between autonomous vehicles / Kolesnikov M.P., Mashonin A.I., Pashkevich I.V., Smirnov A.S. Stated.30.10.2019. Publ.22.06.2020. Bl. №18. (In Rus).
13. Pat. RF No. 2066852. Method of determining the distribution of the speed of sound in liquid media by depth./Pavlikov S.N.. Zavl. 28.05.1883., Publ. 20.09.1996. (In Rus).

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

**Сергей Николаевич Павликов**, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственной университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: psn1953@mail.ru.

**Екатерина Юрьевна Копаева**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственной университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: katya.kopaeva.97@mail.ru.

**Юрий Юрьевич Колесов**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственной университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: kolesov\_jr@mail.ru.

**Павел Николаевич Петров**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственной университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: PavelNikol97@gmail.com,

**Sergej N. Pavlikov** Ph.D. (Eng), Professor, Professor of the Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russia, Vladivostok, 690059, Vladivostok, Str., 50a, e-mail: psn1953@mail.ru.

**Ekaterina Yu. Kopaeva**, 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, Russia, Vladivostok, 690059, Vladivostok, Str., 50a, e-mail: katya.kopaeva.97@mail.ru.

**Yuriy Yu. 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, Russia, Vladivostok, 690059, Vladivostok, Str., 50a, e-mail: kolesov\_jr@mail.ru.

**Pavel N. Petrov** 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, Russia, Vladivostok, 690059, Vladivostok, Str., 50a, e-mail: PavelNikol97@gmail.com,

**Андрей Николаевич Крючков**, кандидат технических наук, доцент кафедры Тихоокеанского высшего военно-морского училища имени адмирала С.О. Макарова, Россия, Владивосток, 690006, Днепроvский пер., 6. e-mail: *krychkov@mail.ru*

**Andrey N. Kryuchkov** Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department Pacific Higher Naval School named after Admiral S.O. Makarov. , Russia, Vladivostok, 690006, Dneprovsky str., 6. e-mail: *krychkov@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 17.11.2021; одобрена после рецензирования 20.01.2022, принята к публикации 24.02 2022

The article was submitted 17.11.2021; approved after reviewing 20.01.2022; accepted for publication 24.02.2022.

Научная статья

УДК 519.25, 004.93

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.029>

## Систематизация алгоритмов спектральной обработки морских изображений

Я.А. Селиверстов<sup>1</sup> Seliverstov-yr@mail.ru, Н.Ю. Пышкина<sup>3</sup> pyshkinanady@yandex.ru,  
Ш.С. Фахми<sup>1,2</sup> shakeebf@mail.ru, Я.А. Хасан<sup>2</sup> midocom@mail.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 изображений в настоящее время имеет важное значение для таких приложений, как передача и хранение информации при проектировании морских систем наблюдения и управления. Анализируются процессы спектрального сжатия изображений и типы избыточности информации. В этой статье рассмотрена проблема систематизации и выбора оптимального алгоритма сжатия изображений в зависимости от заданных требований по качеству передаваемой видеоинформации и пропускной способности канала связи. Предложена систематизация алгоритмов сжатия и восстановления морских изображений на основе спектральных преобразований исходного сигнала из пространственной области в частотную область: дискретное вейвлет преобразование, дискретное косинусное преобразование и пирамидально-рекурсивное преобразование. Разработана методика выбора эффективного алгоритма сжатия с учетом статистических характеристик сигнала изображений. Рассмотрены и показаны преимущества и недостатки различных алгоритмов сжатия морских изображений в оттенках серого и приведено экспериментальное сравнение алгоритмов сжатия различных морских сюжетов формата 256×256 и 512×512 и получены информационные показатели качества систем обработки видеоинформации.

**Ключевые слова:** Систематизация, морские суда, коэффициент сжатия, восстановление, точность, битовая скорость передачи, вычислительная сложность

**Для цитирования:** Фахми Ш.С., Селиверстов Я.А., Пышкина Н.Ю., Хасан Я.А. Систематизация алгоритмов спектральной обработки морских изображений. Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 215—220

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.029>

## Systematization of algorithms for spectral processing of marine images

Yaroslav A. Seliverstov<sup>1</sup> Seliverstov-yr@mail.ru, Nadezhda Y. Pyshkina<sup>3</sup> pyshkinanady@yandex.ru,  
Shakeeb S. Fahmi<sup>1,2</sup> shakeebf@mail.ru, Yazid A. Hassan<sup>2</sup> Midocom@mail.ru

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Russian Federation.

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation.

<sup>3</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The Image compression is currently essential for applications such as transmission and storage in the design of marine surveillance and control systems. The processes of spectral image compression and types of information redundancy are analyzed. This article discusses the problem of systematization and selection of the optimal image compression algorithm depending on the specified requirements for the quality of transmitted video information and the bandwidth of the communication channel. A systematization of algorithms for compression and restoration of marine images based on spectral transformations of the original signal from the spatial domain to the frequency domain is proposed: discrete wavelet transform, discrete cosine transform and pyramidal-recursive transform. A method for selecting an effective compression algorithm is developed taking into account the statistical characteristics of the image signal. The advantages and disadvantages of various algorithms for compressing marine images in shades of gray are considered and shown, and an experimental comparison of compression algorithms for various marine scenes in 256×256 and 512×512 formats is given, and information quality indicators of video information processing systems are obtained.

**Keywords:** Systematization, marine vessels, compression ratio, recovery, accuracy, bit rate, computational complexity

**For citation:** Shakeeb S. Fahmi, Yaroslav A. Seliverstov, Nadezhda Y. Pyshkina, Yazid A. Hassan. Systematization of algorithms for spectral processing of marine images, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 215—220

### Введение

Спектральное сжатие изображений - это применение механизмов сжатия данных к цифровым полутоновым изображениям, на основе тригонометрических функций преобразования из

пространственной в частотную область исходного сигнала изображения с целью уменьшения избыточности визуальных данных таким образом, чтобы иметь возможность хранить или передавать необходимую видеоинформацию в сжатой форме при сохранении качества и соблюдении условий



ограничения пропускной способности канала связи. Несжатые мультимедийные данные (графика, аудио и видео) требуют значительного объема памяти и пропускной способности канала передачи. Несмотря на быстрый прогресс в области плотности хранения данных, скорости процессора и производительности цифровых систем связи, спрос на емкость хранилища данных и пропускную способность передачи данных продолжает опережать возможности доступных технологий. Недавний рост числа мультимедийных веб-приложений с интенсивным использованием видеоинформации не только подтвердил потребность в более эффективных способах кодирования сигналов изображений, но и сделал сжатие таких сигналов центральным элементом технологий хранения и связи.

Общей характеристикой большинства изображений является то, что соседние пиксели коррелированы и, следовательно, содержат избыточную информацию. В целом можно выделить три типа избыточности:

а) Избыточность кодирования. Код - это система символов (букв, цифр, битов и т.п.), используемая для представления массива информации или набора событий. Каждой части информации или событиям присваивается последовательность кодовых символов, называемых кодовым словом. Количество символов в каждом кодовом слове равно его длине. 8-битные коды, которые используются для представления интенсивностей в большинстве двумерных массивов интенсивности, содержат больше битов, чем необходимо для представления интенсивностей.

б) Пространственная избыточность и временная избыточность. Поскольку пиксели большинства двумерных матриц интенсивности пространственно коррелированы, информация излишне реплицируется в представлениях коррелированных пикселей. В видеопоследовательности, коррелированные во времени пиксели также дублируют информацию.

в) Несущественная информация. Большинство двумерных изображений состоят из двух компонентов – объект и фон. При этом при решении задачи сжатия часто на практике требуется отделение объекта от фона. Избыточная информация в таком случае представляет собой фон, который игнорируется зрительной системой человека и не имеет отношения к требуемым областям изображения. Это избыточно в том смысле, что фон не используется. Исследования по сжатию изображений направлены на уменьшение количества битов, необходимых для представления тех областей, являющимися важными с точки зрения дальнейшего применения.

На основе выше сказанного на рынке технологий обработки видеоинформации появилось огромное множество различных спектральных методов и алгоритмов сжатия, целью которых, в первую очередь, уменьшение избыточности при полном абстрагировании от понимания и смысла видеоинформации. При этом главная задача всех алгоритмов заключается исключительно, в том, чтобы найти менее коррелированное представление изображения.

Задача декорреляции основано на двух основных компонентах сжатия – это избыточность и передача полезной информации. Уменьшение избыточности направлено на устранение дублирования или повторения значений в самом источнике (изображения/видео), а передача полезной информации заключается в исключении тех частей сигнала, которые не будут замечены приемником сигнала, а именно зрительной системой человека [1,2].

Таким образом, основными задачами данной статьи являются:

- разработка систематизации спектральных алгоритмов сжатия изображений для обеспечения оптимального выбора алгоритма в зависимости от заданных параметров систем обработки видеоинформации;
- сравнение основных существующих алгоритмов сжатия изображений;
- разработка методики выбора алгоритма сжатия морских изображений.

### **Систематизация алгоритмов косинусного преобразования изображений**

Применяемые в области обработки цифровых изображений и в технике связи подходы сжатия были классифицированы по ряду специфических признаков в [3].

Систематизация спектральных алгоритмов сжатия и восстановления изображений, приведенная в данной статье (рис. 1) не исчерпывает всего изобилия и разнообразия алгоритмов сжатия на основе дискретного спектрального преобразования, но отражает все те алгоритмы и программы, которые являются стандартами и те алгоритмы, которые были разработаны в Институте проблем транспорта РАН. Поэтому их систематизация необходима, как условие для выбора наиболее эффективного алгоритма с точки зрения специфики морских сюжетов и требования к решаемой проблеме.

*Критерий оценки и выбора алгоритмов сжатия морских изображений.*

Главными критериями для оценки и сравнения параметров конкретных реализаций алгоритмов сжатия и восстановления изображений с использованием тригонометрических функций, в частности косинус-функции, в контексте результативности их работы являются [4,5]:

- точность восстановления: объективная оценка среднеквадратического отклонения результирующих изображений от исходных;
- битовая скорость передачи сжатой видеоинформации: определяется, как количество бит на пиксель;
- вычислительная сложность алгоритмов сжатия: число операций, необходимых для сжатия изображений;
- качество информации: отношения исходного сигнала к шуму (СИГ/ШУМ).

Важно отметить, что систематизация алгоритмов сжатия изображений, приведенная на рисунке 1, не охватывает всех возможных вариантов и способов реализации спектрального анализа.

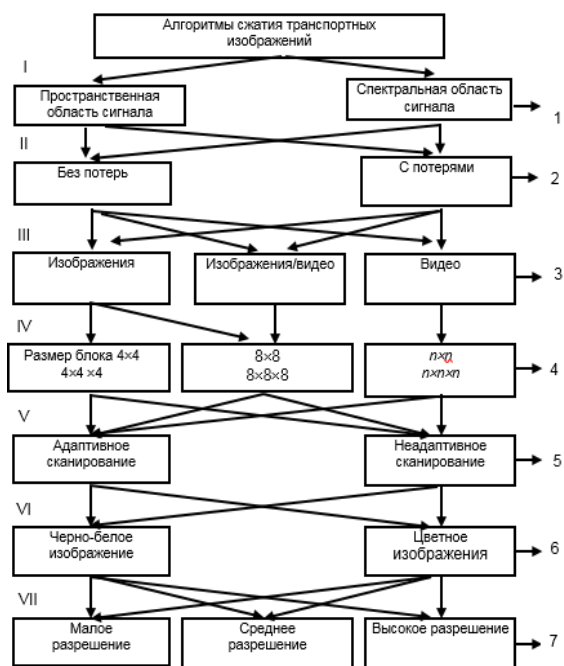


Рис. 1. Систематизация алгоритмов сжатия морских изображений

Предложенная систематизация позволяет выбрать наиболее эффективный вариант при решении разнообразных задач сжатия и восстановления изображений (рис. 1).

Признаками, на основе которых разработана данная систематизация являются [6,7]:

1. Область обработки. Пространственная или спектральная область обработки. При прогностическом кодировании информация, уже отправленная или доступная, используется для прогнозирования будущих значений, и разница кодируется. Поскольку это делается в изображении или пространственной области, это относительно просто реализовать и легко адаптируется к локальным характеристикам изображения. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция является одним из конкретных примеров прогнозирующего кодирования. Кодирование преобразования, с другой стороны, сначала преобразует изображение из представления пространственной области в представление другого типа с использованием некоторого хорошо известного преобразования, а затем кодирует преобразованные значения (коэффициенты). Этот метод обеспечивает большее сжатие данных по сравнению с методами прогнозирования, хотя и за счет больших вычислений.

2. Тип сжатия. Сжатие без потерь и сжатие с потерями. В схемах сжатия без потерь восстановленное изображение после сжатия численно идентично исходному изображению. Однако сжатие без потерь может обеспечить лишь незначительную степень сжатия. Изображение, восстановленное после сжатия с потерями, содержит ухудшение по сравнению с оригиналом. Часто это происходит из-за того, что схема сжатия полностью отбрасывает избыточную информацию. Однако схемы с потерями способны обеспечить гораздо более высокое сжатие. При нормальных условиях

просмотра видимые потери не ощущаются (визуально без потерь).

3. Тип видеoinформации. статические или динамические изображения;

- статические изображения представляют собой матрицы целых значений яркостей, и характеризуются пространственной избыточностью;

- динамические представляют собой последовательность изображений (видео) и характеризуются пространственной и временной избыточностью.

4. Размер блоков ДКП. Перед операцией ДКП на этапе предварительной обработки осуществляется разбиение изображений на блоки различного размера горизонтальный, вертикальный и зигзагообразный в зависимости от ориентации (анизотропии) соседних яркостей пикселей на изображениях.

5. Формат изображений. Изображения морских судов могут иметь либо черно/белый или цветной формат.

6. Разрешение. Малое, среднее и высокое разрешение: в работе были исследованы следующие типы разрешения.

Разнообразие способов выполнения дискретного косинусного преобразования (ДКП) и комбинация различных алгоритмов по всем, выше перечисленным, признакам (1-6) привели к постановке задачи о методике выбора того или иного алгоритма сжатия с учетом преимущества недостатков каждого конкретного алгоритма.

**Преимущества и недостатки алгоритмов сжатия**

Предложенная систематизация включает следующие основные методы и алгоритмы сжатия и восстановления изображений:

- 1) дискретное косинусное преобразование, являющееся основой стандарта сжатия JPEG;
- 2) адаптивное дискретное косинусное преобразование, разработанное и протестированное ИПТ РАН;
- 3) дискретное вейвлет-преобразование (ДВП), являющееся основой стандарта JPEG 2000 [8,9].

Преимущества и недостатки выше перечисленных методов и алгоритмов показаны в таб.1.

Таблица 1

**Преимущества и недостатки алгоритмов сжатия**

| Метод | Преимущества                         | Недостатки  |
|-------|--------------------------------------|---|
| ДКП   | Текущий стандарт, простая реализации | Распределение битов квантованных коэффициентов                    |
| АДКП  | Высокая точность,                    | Высокая сложность   |
| ДВП   | Высокая степень сжатия,              | Распределение битов квантованных коэффициентов, высокая сложность |

**Методика выбора алгоритма сжатия морских изображений**

Все крупные производители видеосистем наблюдения активно внедряют аппаратное обеспечение нового поколения, которое включает в себя несколько ядер на одном кристалле, иногда с дополнительными возможностями одновременной многопоточности наряду с другими встроенными ускорителями. Ожидается, что количество

настроенных ядер будет быстро расти, так что даже в относительно краткосрочной перспективе можно ожидать, что один кристалл будет поддерживать выполнение нескольких сотен потоков. Таким образом, почти все будущие платформы будут напрямую поддерживать параллельные приложения. Существует большое разнообразие в проектировании микросхем, особенно в количестве и характере совместного использования ресурсов между потоками в одной системе.

При наличии большого объема встроенной памяти и потенциально общего кэша и путей передачи данных совместное использование ресурсов может принести пользу, а борьба за ресурсы между потоками может отрицательно сказаться на производительности. Следовательно, для создания систем наблюдения и управления морскими судами с высокой производительностью необходимо сбалансировать и обеспечить оптимальный выбор параметров системы обработки видеoinформации. При этом важнейшим этапом построения таких систем наблюдения является выбор оптимального алгоритма обработки видеoinформации, а выбор алгоритма зависит в первую очередь от заданных параметров системы в целом.

Методика выбора эффективного алгоритма сжатия с учетом статистических характеристик сигнала изображений для конкретных прикладных приложений морской специфики, осуществляется путём задания значений необходимых внутренних и внешних параметров устройств наблюдения.

3.1. В качестве внутренних параметров устройств наблюдения вступают следующие параметры: погрешность вычисления, размерность шин данных устройств морского наблюдения для обмена визуальными данными, количество операций для выполнения преобразования морского сюжета, площадь кристалла для размещения всех элементов устройства сжатия.

3.2. В качестве внешних параметров для построения устройств наблюдения вступают: точность восстановления результирующих изображений, битовая скорость передачи сжатых визуальных данных, т.е. заданная пропускная способность канала связи.

### Сравнение алгоритмов сжатия различных морских сюжетов

В таблицах 2 и 3 показана производительность различных алгоритмов, в которых указано значение отношения сиг./шум и время процессора (сек.) при выполнении сжатия и восстановления морских изображений различных классов (рис. 2). А также показано сравнение степени сжатия различных алгоритмов в таб. 4, приведенной ниже.

Таблица 2  
Производительность алгоритмов сжатия на изображениях 256×256

| Алгоритм | Сиг/Шум | Недостатки |                |
|----------|---------|------------|----------------|
|          |         | Сжатие     | Восстановление |
| ДКП      | 34.52   | 0.35 сек.  | 0.27 сек.      |
| АДКП     | 39.45   | 0.98 сек.  | 0.57 сек.      |
| ДВП      | 37.69   | 0.73 сек.  | 0.64 сек.      |

Таблица 3  
Производительность алгоритмов сжатия на изображениях 512×512

| Метод | Преимущества | Недостатки |
|-------|--------------|------------|
| ДКП   | 36.11        | 0.65 сек.  |
| АДКП  | 38.32        | 1.12 сек.  |
| ДВП   | 36.43        | 0.98 сек.  |

Таблица 4  
Степени сжатия различных алгоритмов кодирования

| Алгоритм | Коэффициент сжатия морских изображений |
|----------|--|
| ДКП      | 60-70                                  |
| АДКП     | 80-90                                  |
| ДВП      | 70-80                                  |

Восстановленные изображения морских судов, основанные на всех алгоритмах: а) ДКП, б) АДКП и в) ДВП, показаны на рис. 3.



Рис. 2. Морские изображения: Северного морского пути и наблюдение судов под Крымским мостом



Рис. 3. Результаты сжатия и восстановления Морских изображений (случае 0,3 бит/пиксель): а) ДКП, б) АДКП и в) ДВП

### Заключение

В представленной работе были решены следующие задачи: осуществлена систематизация спектральных алгоритмов сжатия изображений обеспечивающая надлежащий выбор алгоритма в зависимости от параметров систем обработки видеoinформации; представлено сравнение основных существующих алгоритмов сжатия

изображений; осуществлена разработка методики выбора алгоритма сжатия морских изображений.

Экспериментальные сравнения на широко используемых морских изображениях (морские суда под Крымским мостом и Северного морского пути) размером 256 × 256 и 512×512 позволяют сделать следующие выводы:

- любой из трёх алгоритмов: дискретного косинусного преобразования, дискретного вейвлет-преобразования и адаптивного косинусного преобразования является удовлетворительным для случая 0,3 бит/пиксель;

- для очень низкой битовой скорости передачи данных, например, 0,02 бит/пиксель или ниже, алгоритм адаптивного косинусного преобразования превосходит другие алгоритмы;

- для практических применений рекомендуется алгоритм сжатия на основе стандартного косинусного преобразования из-за его простоты реализации и минимальных требований вычислительной сложности;

- алгоритм, основанный на адаптивном косинусном преобразовании, может использовать адаптивную таблицу квантования, что позволяет достичь максимального коэффициента сжатия при передаче морских сюжетов.

Применение разработанной методики выбора алгоритма в устройствах обработки видеoinформации морской интеллектуальной транспортной системы позволит повысить эффективность и качество ее функционирования.

### Литература

1. Gonzalez, R.C.; Woods, R.E.; Eddins, S.L. Digital Image Processing Using MATLAB; Pearson Education: Chennai, Tamil Nadu, India, 2004.
2. Фахми Ш. С. Кодирование видеосигналов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». 2007. Вып. 3. С.34-40.
3. Сигов А. С., Нефедов В. И. Основы радиоэлектроники и связи. М.: Выш. Школа. 2009. 735с.
4. Фахми Ш.С., Королёв О.А., Костикова Е.В. Кодирование без потерь и передача изображений морских судов в условиях ограничения канала связи// Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 1-1 (51). С. 45-52.
5. Фахми Ш.С., Селиверстов С.А., Костикова Е.В., Муксимова Р.Р., Титов В.О. Видеосистема наблюдения за морскими судами в реальном времени// Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. № 2 (53). С. 98-105.
6. Srairi K, Messaoudi A. Colour image compression algorithm based on the DCT transform using difference lookup table. Electronics Letters, 2016, 52(20):1685-1686.
7. Li S , Yin H , Fang X , et al. Lossless Image compression Algorithm and Hardware Architecture for Bandwidth Reduction of External Memory. IET Image Processing, 2017, 11(6):379-388.
8. C. S. Burrus, R. A. Gopinath and H. Guo, Introduction to Wavelets and Wavelet Transform, (Prentice-Hall, 1998).
9. Miaou, S.G.; Ke, F.S.; Chen, S.C. A lossless compression method for medical image sequences using JPEG-LS and interframe coding. IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed. 2009, 13, 818–821.
10. Paeth, A.W. Image file compression made easy. In Graphics Gems II; Morgan Kaufmann: Burlington, MA, USA; NeuralWare, Inc.: Pittsburgh, PA, USA, 1991; pp. 93–100.

### References

1. Gonzalez, R.C.; Woods, R. E.; Eddins, S. L. Digital Image Processing Using MATLAB; Pearson Education: Chennai, Tamil Nadu, India, 2004.
2. Fahmi S. Kodirovaniye videosignalov [Encoding video], Izv. Etu "LETI". Ser. "Informatics, management and computer technology". 2007. Issue pp.34-40.
3. Sigov A.S., Nefedov V.I. Osnovy radioelektroniki i svyazi. [Fundamentals of radio electronics and communications]. Moscow: Vysh. School. 2009. 735с.
4. Fahmi Sh.S., Korolev O.A., Kostikova E.V. Kodirovaniye bez poter' i peredacha izobrazheniy morskikh sudov v usloviyakh ogranicheniya kanala svyazi [Lossless coding and transmission of images of sea vessels in conditions of limited communication channel]// Marine intelligent technologies. 2021. No. 1-1 (51). pp. 45-52.
5. Fahmi Sh.S., Seliverstov S.A., Kostikova E.V., Muximova R.R., Titov V.O. Videosistema nablyudeniya za morskimi sudami v real'nom vremeni [Real-time video surveillance system for marine vessels]// Marine intelligent technologies. 2021. Vol. 1. No. 2 (53). pp. 98-105.
6. Srairi K, Messaoudi A. Colour image compression algorithm based on the DCT transform using difference lookup table. Electronics Letters, 2016, 52(20):1685-1686.
7. Li S , Yin H , Fang X , et al. Lossless Image compression Algorithm and Hardware Architecture for Bandwidth Reduction of External Memory. IET Image Processing, 2017, 11(6):379-388.
8. C. S. Burrus, R. A. Gopinath and H. Guo, Introduction to Wavelets and Wavelet Transform, (Prentice-Hall, 1998).
9. Miaou, S.G.; Ke, F.S.; Chen, S.C. A lossless compression method for medical image sequences using JPEG-LS and interframe coding. IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed. 2009, 13, 818–821.
10. Paeth, A.W. Image file compression made easy. In Graphics Gems II; Morgan Kaufmann: Burlington, MA, USA; NeuralWare, Inc.: Pittsburgh, PA, USA, 1991; pp. 93–100.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Шакиб Субхиевич Фахми**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Ведущий научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13., e-mail: shakeebf@mail.ru

**Ярослав Александрович Селиверстов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: Seliverstov-yr@mail.ru

**Надежда Юрьевна Пышкина**, старший преподаватель кафедры Математического моделирования и прикладной информатики Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д.5/7, e-mail: pyshkinanady@yandex.ru

**Язид Абдулхамид Хасан** аспирант 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 I, помещение 11-53, e-mail: midocom@mail.ru

**Shakeeb S. Fahmi**, Dr. Sci. (Eng), associate Professor, Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russian Federation.

Leading researcher at the Institute of transport problems. N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12 Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: shakeebf@mail.ru

**Yaroslav A. Seliverstov**, Phd (Eng), Senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: Seliverstov-yr@mail.ru

**Nadezhda Y. Pyshkina**, senior Lecturer of the department of Mathematical Modeling and Applied Computer Science, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St.Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: email: pyshkinanady@yandex.ru

**Yazid A. Hassan** postgraduate student, Department of Computer Aided Design St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin) 197376, St. Petersburg, St. Professora Popova, house 5, building I, room 11-53 , Russian Federation, e-mail: Midocom@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022, принята к публикации 21.02.2022

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 21.02.2022.

Научная статья

УДК 004.057.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.030>

## Потоковые сетевые протоколы и результаты проекта RACUN

А.М. Астапкович<sup>1</sup> [tatalex2@gmail.com](mailto:tatalex2@gmail.com), И.В. Кожемякин<sup>2</sup> [1861vp@mail.ru](mailto:1861vp@mail.ru),  
Т.К. Шарафутдинова<sup>1</sup> [sharafutdinova.taya@yandex.ru](mailto:sharafutdinova.taya@yandex.ru), А.С. Шустов<sup>2</sup> [semte@semte.ru](mailto:semte@semte.ru)  
<sup>1</sup>ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н.Г. Кузнецова, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный морской  
технический университет

**Аннотация.** В силу нелинейности гидроакустического канала актуальными являются задачи сбора экспериментальных данных, обеспечивающих возможность разработки моделей канала, тестирования и отбора перспективных протокольных решений. Статья представляет аналитический обзор результатов проекта RACUN (Robust Acoustic Communications in Underwater Net-works) и предшествующих теоретических работ по разработке потоковых протоколов. В рамках этого проекта разработаны и в натурных условиях исследованы два потоковых протокола обмена данными Dflood и GUWMANET. В работе выполнен комплексный анализ, как результатов проекта, так и предшествующих теоретических работ по разработке потоковых протоколов. Выделены перспективные программно-аппаратные решения. По результатам анализа поставлены задачи разработки отечественного SDM модема и создания единой базы экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** подводные сети, многослойная топология с неоднородными узлами, сетевые протоколы, моделирование сетей, проект RACUN.

**Для цитирования:** Астапкович А.М., Кожемякин И.В., Шарафутдинова Т.К., Шустов А.С. Потоковые сетевые протоколы и результаты проекта RACUN, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, Номер 1. С. 221—233

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.030>

## Flood network protocols and project RACUN results

Alexander M. Astapkovich<sup>1</sup> [tatalex2@gmail.com](mailto:tatalex2@gmail.com), Igor' V. Kozhemyakin<sup>2</sup> [1861vp@mail.ru](mailto:1861vp@mail.ru),  
Taisiia K. Sharafutdinova<sup>1</sup> [sharafutdinova.taya@yandex.ru](mailto:sharafutdinova.taya@yandex.ru), Aleksey S. Shustov<sup>2</sup> [semte@semte.ru](mailto:semte@semte.ru)  
<sup>1</sup>VMPI VUNC VMF VMA, St. Petersburg, Russian Federation, <sup>2</sup>St. Petersburg state marine technical University,  
Russian Federation

**Abstract.** Underwater acoustic networks have used nonlinear channel to transmit data so the sea trials are necessary part of the developing process. The experimental results used as base for realistic simulation model for next stage of R&D. This paper presents the analytical review of the project RACUN results also as the set of previous publications devoted to flooding protocols Dflood and GUWMANET. Protocols implement the multi-hop approach to achieve a higher maximum transmission range for a multilayer net topology. Most important features and limitations of the protocols have described in details. Hardware, channel simulation model and the used project methodology for a protocol development has described in brief. Architecture of universal SDM (Software Defined Modem) used as hardware solution has described.

**Keywords:** Underwater acoustic networks, RACUN project; sea trials, flooding protocols Dflood and GUWMANET, channel simulations, Software Defined Modem.

**For citation:** Alexander M. Astapkovich, Igor V. Kozhemyakin, Taisiia K. Sharafutdinova, Aleksey S. Shustov Flood network protocols and project RACUN results, Marine intellectual technologies. 2022. Part. 1, no. 1. P. 221—233

### Введение

В настоящее время существенно возрос спрос к использованию мобильных сетей с автономными узлами и использованием гидроакустического канала в качестве среды передачи данных. Оценка текущего состояния исследований в этой области имеется в обзорах [1]–[3].

На протяжении последних десяти лет в ЕС создается научная и технологическая основа для развития подводных информационно-управляющих сетей на основе гидроакустического канала. Существенная нелинейность гидроакустического канала предопределяет необходимость проведения натурных экспериментов. Целью таких экспериментов является создание базы

экспериментальных данных, обеспечивающих возможность прикладных разработок.

Высокая стоимость натурных экспериментов является причиной того, что заказчиками ряда прикладных НИОКР выступали EDA (European Defense Agency) и оборонные ведомства ведущих стран Европы. Соответственно, это во многом определило постановку задач исследования. Эти НИОКР выполнялись в рамках кооперации ряда ведущих университетов и исследовательских центров группы корпораций из Германии, Нидерландов, Норвегии, Италии и Швеции.

Проект RACUN (Robust Acoustic Communications in Underwater Net-works) фокусировался на ключевых аспектах информационного обмена по гидроакустическому каналу в сетевых структурах [3], [4]. Работы по проекту начались в 2010 г. и

закончились в 2014. Проект реализовывался в три этапа. На первом этапе проекта использовались известные на тот момент решения, которые позволили осуществить системную интеграцию проекта. Проведенные натурные испытания позволили собрать экспериментальные данные, которые использовались на следующих этапах проекта.

Результатом его реализации явилось создание базы экспериментальных данных по параметрам гидроакустического сигнала и шумов в разных географических условиях; разработка протоколов обмена и измерение параметров в режиме натуральных испытаний; выработка перспективных подходов к аппаратно-программной реализации каналообразующей аппаратуры.

Результаты проекта многоплановы и представляют интерес с точки зрения организации работ, постановки задачи исследования и подходов к их решению, а самое главное, полученных в ходе натуральных экспериментов результатов. В силу специфики организации проекта эти публикации принадлежат разным исследовательским группам и освещают разные аспекты проекта.

Работа представляет собой аналитический обзор результатов финального (ST3) этапа реализации проекта RACUN. Обзор выполнен по результатам открытых публикаций. Обзор не ставил своей целью описание протоколов в деталях. По понятным соображениям доступ к информации по проекту ограничен. Приведенные данные заимствованы из открытых публикаций и относятся к разным стадиям реализации проекта. Соответственно, имеются определенные расхождения в деталях. Работа по разработке сетевых протоколов для гидроакустического канала, продолжается в очередном НИОКР в виде проекта DUSN (Distributed Underwater Sensor Networks). Проект реализуется в кооперации исследовательских групп Канады, Норвегии и Швеции [5].

В силу этого в обзоре основное внимание уделено концептуальным подходам. Они представляют интерес как при планировании НИОКР по данному направлению, так и непосредственно для разработчиков потоковых протоколов для передачи данных по гидроакустическим каналам.

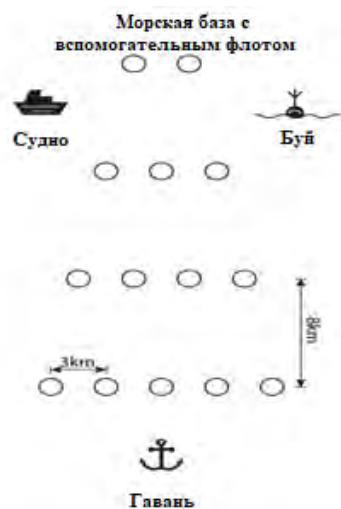
#### Потоковые протоколы для гидроакустических применений

В первоначальной постановке задачи исследования для проекта RACUN была специфицирована базовая топология сети, приведенная на рис. 1. а.

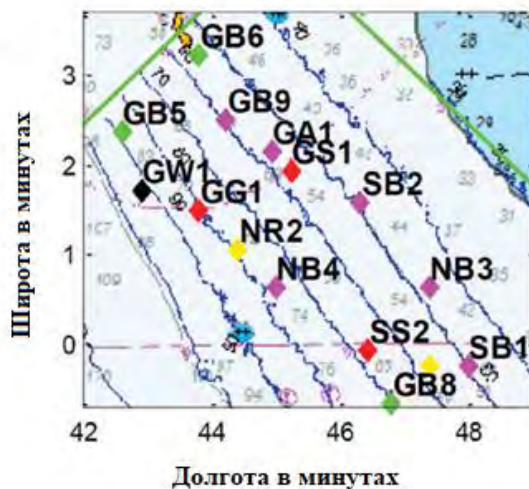
Одной из задач проекта являлась разработка решений передачи данных на практически неограниченную дальность при наличии ограничений на энергетику узлов. При этом эти решения должны обеспечивать возможность использования подвижных узлов. При такой постановке задачи ближайшим аналогом являются сотовые сети мобильной связи на основе радиоканала.

На третьем этапе проекта RACUN в натуральных экспериментах использовались и сравнивались потоковые протоколы GUWMANET и Dflood [4].

Протокол GUWMANET был включен в программу испытаний третьего этапа по результатам моделирования с использованием экспериментальных данных, полученных на первых двух этапах. При этом существенным образом использовалась технология имитационного моделирования с использованием набора моделей каналов. По сути, на третьем этапе проекта проверялась действенность такой методологии разработки.



а) Исходная спецификация на топологию сети



б) Топология и состав сети натуральных испытаний третьего этапа

Рис. 1. Топология подводной сети RACUN.

Обозначения узлов с рис. б): первый символ: G - Германия, N - Норвегия, S - Швеция; второй символ: B - придонный узел, G - ретранслятор S - корабль, R - пассивный регистратор, W - надводный узел; третий символ: порядковый номер узла.

В работе [3] предложена классификация подводных гидроакустических сетей по параметрам дальность – частота. Предлагаемое ранжирование сетей приведено в табл. 1.

Таблица 1.  
Классификация гидроакустических сетей

| Тип сети                               | Дальность, км | Частота, кГц |
|--|---------------|--------------|
| Very long<br>Сверхдальний              | 1000          | <1           |
| Long<br>Дальний                        | 10-100        | 2            |
| Medium<br>Средней<br>дальности         | 1-10          | 10           |
| Short<br>Малой<br>дальности            | 0.1-1         | 22-50        |
| Very Short<br>Сверх малой<br>дальности | < 0.1         | >100         |

Формально, в соответствии с этой классификацией каналообразующая аппаратура проекта RACUN с использованием протоколов Dflood и GUWMANET относится к классу сетей Medium, так как предназначена для работы на расстояниях до 10 км. При этом за счет перетрансляции возможна реализация на их основе сетей класса Long. Естественно, что в этом случае ограничения по частоте не являются определяющими.

Модель OSI (Open System Interface) изначально являлась стандартом для описания сетей с фиксированной топологией. Но она оказалась универсальной и сегодня терминология этого стандарта определяет формат описания протоколов сотовых сетей мобильной связи. В терминах OSI модели уровень описания протоколов Dflood и GUWMANET называется сетевым.

В связи с широким распространением этой технологии наработан спектр концептуальных решений, которые представляется естественным использовать и в мобильных беспроводных сетях на основе гидроакустического канала. Для такого рода сетей характерной чертой является переменный состав сети.

Современные цифровые сети мобильной с точки зрения топологии являются сотовыми. Их ключевыми особенностями являются:

- наличие двух типов узлов (стационарных и мобильных);
- наличие мобильных узлов и переменный состав сети в окрестности локального стационарного узла;
- ограничение на энергетику мобильных узлов;
- необходимость передачи данных на практически не ограниченную дальность.

Информационный обмен между мобильными узлами осуществляется через стационарные узлы, которые не имеют ограничений по энергетике. Соответственно, это помогает передавать данные на любые расстояния за счет перетрансляции данных от одного стационарного узла другому, вплоть до получения данных мобильным узлом получателем пакета. Для реализации информационного обмена в такого рода сетях разработаны и широко применяются, так называемые потоковые протоколы. Для механизма перетрансляции пакетов в англоязычной литературе применяют термин flooding.

Передача данных по подводному гидроакустическому каналу имеет ряд принципиальных отличий от радиоканала:

- очень узкий частотный диапазон;
- большие задержки при передаче пакетов данных;
- существенная нелинейность и, как одно из следствий, нестабильность параметров гидроакустического канала передачи;
- принятие во внимание локальных условий использования из-за необходимости учитывать отражения сигнала, его рефракцию и т.п.

Эти отличия существенным образом влияют на все уровни реализации соответствующих протоколов.

Протоколы для передачи данных по радиоканалу, базируются на предположении что скорость передачи данных существенным образом превышает скорость распространения в канале передачи. Низкая скорость распространения звука под водой 1400-1560 м/сек существенным образом влияет на скорость доставки сообщений на расстояниях масштаба 10 км. На таком расстоянии задержка составляет 6-7 сек.

В результате учета ряда ограничений протокол GUWMANET реализует специализированный метод передачи данных в виде коротких пакетов. Длина пакета составляет 128 бит плюс 10 служебных битов. Пакет передается за 0.3 сек.

Еще одним существенным ограничением является нелинейность среды передачи применительно к несущей частоте. Существенное поглощение высокочастотной составляющей привело разработчиков к необходимости использования частотного диапазона 3,5–7,5 кГц, который считается оптимальным применительно к специфицированным в проекте RACUN параметрам. Как следствие, появляются существенные ограничения на максимальную скорость передачи данных. Отсюда в свою очередь возникают ограничения на количество узлов с сети.

В натуральных испытаниях третьего этапа проводилось тестирование двух типов сетевых протоколов и Dflood и GUWMANET [4]. Эти потоковые протоколы, существенным образом используют ряд решений, отработанных для сетей мобильной связи. Вместе с тем это специализированные протоколы, учитывающие специфику гидроакустического канала. Ряд концептуальных решений, использованных в этих протоколах, будет рассмотрен ниже.

#### Аппаратное обеспечение проекта RACUN

Топология сети для третьего этапа натуральных испытаний приведена на рис. 1, b. Количественный состав оборудования, использованного при проведении комплексных экспериментов приведен в табл. 2.

Исходная спецификация на топологию и состав узлов приведена на рис. 1, a. Она включает в себя 14 подводных узлов, образующих 4 параллельных охранных барьера. Система должны обеспечить фиксацию проникновения и передачу данных на верхний уровень системы. Расстояние между узлами крайних уровней системы значительно - около 30 км. При этом минимальное расстояние между стационарными узлами также значительно, и равно 3

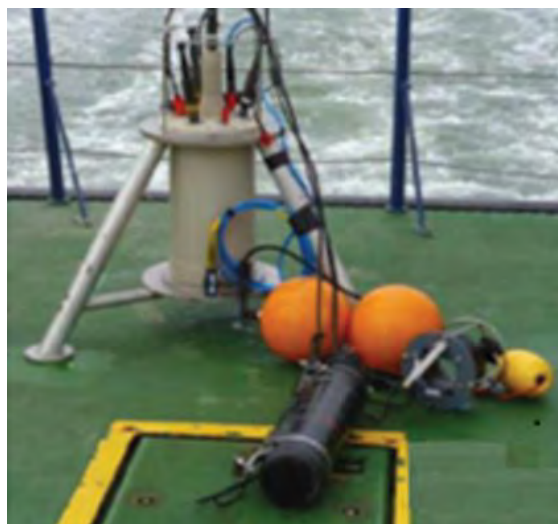


км. Внешний вид оборудования представлен на рис. 2-3.

В проекте использовались два типа придонных узлов, представленных на рис. 2. На начальной стадии придонные узлы в версии NILUS (МК1) использовали модемы компании Teledyne Benthos (США). На третьей стадии проекта каналобразующая аппаратура для узла NILUS была заменена на версию МК2. Она обеспечивала возможность реализации протоколов, описываемых программным способом [7].



а) NILUS (FFI, Норвегия)



б) NEREUS (FWG, Германия)  
Рис. 2. Внешний вид придонных узлов

Передающий узел узла NILUS находится на 6 метрах от дна в специальном буйе. В нем также находится усилитель, узел сопряжения и излучатель (3-11 кГц, с частотным диапазоном -3 дБ.). Микрофон для приема и предусилитель монтируются на пирамидальной конструкции на высоте 1 м от дна.

Таблица 2.

Конфигурация серии испытаний ST3

| Сценарий              | ISR                        |                   | MSM               |                   |
|-----------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                       | GUWMANET                   | Dflood            | GUWMANET          | Dflood            |
| Кол-во донных узлов   | 6                          | 4                 | 6                 | 4                 |
| Кол-во узлов на судах | 2                          | 2                 | 2                 | 2                 |
| АНПА                  | 1 (был поврежден)          | на поверхности    | 1 (был поврежден) | на поверхности    |
| Буй-ретранслятор      | 1                          | 1 (был поврежден) | 1                 | 1 (был поврежден) |
| Скорость, узлы        | 3                          | 3-4               | 3                 | 3-4               |
| Расстояния, м         | 563-8610 м ( между узлами) |                   |                   |                   |
| Глубина, м            | 40-80 м                    |                   |                   |                   |



|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Диаметр                              | 0.325 м.               |
| Ширина                               | 0.576 м                |
| Длина/ Вес                           | 2.5 -3.5 м /130-220 кг |
| Скорость                             | 6 узлов                |
| Монтируемые модули полезной нагрузки | 7 шт.                  |

Рис. 3. АНПА SeaCat (ATLAS, Германия)

Там же монтируются и другие датчики, включая акустические, которые не используются каналобразующей аппаратурой. Кроме этого на базе модуля NILUS были реализованы и исследовались два пассивных регистратора.

В экспериментах использовался буй-ретранслятор компании ELAC (Германия), обеспечивающий ретрансляцию сигналов информации из гидроакустического канала в Wi-Fi радиоканал, и наоборот. Кроме этого в системе имелась возможность использовать надводные, погружаемые с судов узлы. Проблема заключалась в том, что на параметры сети PDR (Packet Delivery Rate) и время задержки существенным образом влияет интенсивность обмена в сети, которая в свою очередь зависит от реализуемого сценария.

Изначально для натурных испытаний предлагалось тестирование предлагаемых решений по четырем базовым сценариям:

- функционирование сети при передаче данных между стационарными и подвижными узлами;

- установление и поддержка надежного информационного обмена в режимах:

- ISR (Intelligence, Surveillance, Reconnaissance - разведка, наблюдение, подтверждение);

- MR (подтверждение обнаружения мин при использовании нескольких АНПА).

Эти сценарии разрабатывались и согласовывались с представителями флотов и министерствами обороны стран участников проекта [4]. Для третьего этапа испытаний первоначальная спецификация на топологию и условия работы была изменена.

Сценарии требовалось отрабатывать в условиях прибрежных вод с глубинами до 200 м. Для учета погодных условий отдельно выделялось требование к возможности эксплуатации системы на протяжении всего года.

Размеры тестового полигона определялись как квадрат 10x10 морских миль. При этом расстояние между узлами внутри слоя должно составлять до 5 морских миль. Максимальная скорость подвижного узла должна была составлять 8 узлов.

В этих условиях требовалось обеспечить доставку пакета в 128 бит с 90% вероятностью с максимальной задержкой между отправителем и получателем не более 5 мин.

Как следует из табл. 2 часть оборудования была повреждена в ходе экспериментов. По всей

видимости, не весь набор назначенных сценариев удалось реализовать.

### Результаты третьего этапа проекта RACUN

Третий этап проекта представлял собой комплексное тестирование наиболее перспективных решений, отобранных по результатам двух первых этапов. В силу этого как сами результаты, так и концептуальные подходы представляются практически важными. Топология сети и ее аппаратный состав приведены на рис. 1 и табл. 2.

### Интегральные параметры сетевого обмена

Данные финального этапа натурных испытаний опубликованы в работе [4]. В работе представлены данные по 4 тестам. Длительность теста составляла 90 минут, так как узлы имели ограничения по энергетике. В обработанном виде результаты представлены в табл. 3.

В табл. 3 приведены экспериментальные данные для двух разных сценариев тестирования ISR и MCM при использовании протоколов GUWMANET и Dflood для каждого из них. Сценарий MCM является модификацией исходного сценария MR для третьей фазы проекта.

Для удобства анализа в таблице приведены данные пересчета из PDR (Packet Delivery Rate - доля успешно доставленных пакетов) в значения BER (Bit Error Rate – доля ошибок при передаче бита).

Таблица 3.

Результаты финальной серии испытаний ST3

| Сценарий-Протокол  | Число узлов | PDR* | BER (Nb=138) | E2E Delay** |
|--------------------|-------------|------|--------------|-------------|
| ISR -GUWMANET      | 11          | 89 % | 0.00084      | 82 сек      |
| ISR - Dflood       | 9           | 68%  | 0.0028       | 121 сек     |
| MCM -GUWMANET      | 9           | 90%  | 0.00076      | 58 сек      |
| MCM - Dflood       | 7           | 70%  | 0.0026       | 107 сек     |
| Длительность теста | 90 минут    |      |              |             |

Пересчет исходных данных в виде PDR в BER производился следующим образом. Пусть BER равна вероятности ошибки при передаче бита. Тогда вероятность передачи без ошибок пакета из Nb бит равна:

$$PDR = (1 - BER)^{Nb} \quad (1).$$

Откуда следует, что используемый протокол обеспечивает вероятность ошибки передачи бита не хуже:

$$BER = 1 - (PDR)^{1/Nb} \quad (2).$$

При пересчете количество битов в пакете принималось Nb=138. Это значение является специфицированным параметром для третьего этапа проекта RACUN. Детали рассмотрены в следующих разделах.

Сравнение по таким ключевым параметрам, как доля успешно доставленных пакетов PDR, среднее время доставки пакета E2E Delay и энергопотребление узла однозначно показывает

преимущество протокола GUWMANET по сравнению с испытанной версией протокола Dflood.

### Формирование базы экспериментальных данных

Для сетей с фиксированной структурой, соответствующей рис. 1 представляется естественным использование стационарной сети питания узлов. Соответственно, в этом случае естественным образом проблема использования гидроакустического канала становится неактуальной. В этом случае представляется естественным использование проводного канала для передачи данных.

В проекте эта сеть с фиксированной структурой должна была обеспечить проверку технологии разработки протокольных решений для гидроакустического канала.

Протокол GUWMANET был предложен в [8] и модифицировался с учетом экспериментальных данных, полученных на первых двух этапах проекта RACUN. Математическое моделирование показало,

что он превосходит протестированную версию протокола Dflood. Результаты натурных испытаний подтвердили этот вывод.

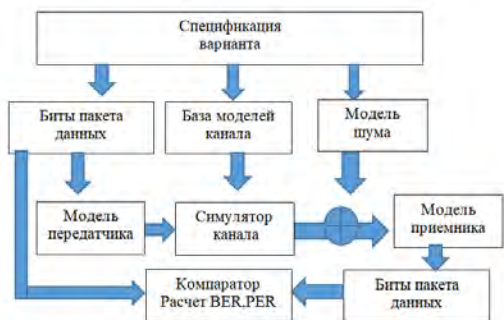
Такой подход существенно эффективнее как по срокам, так и по затратам. Исходя из этого, следует, что ключевым результатом проекта явилось создание базы экспериментальных данных по характеристикам гидроакустического канала в разных условиях и методика ее использования при разработке.

База экспериментальных данных создавалась следующим образом. Все исследовательские группы, задействованные в проекте, проводили натурные испытания своих устройств на всех этапах проекта. Эти эксперименты проводились в разных географических точках и разных условиях окружающей среды. Помимо автономного тестирования своего оборудования им предписывалось использовать специфицированный набор тестовых сигналов. Для сбора данных использовались надводные суда, АНПА и придонные узлы.

В работе [9] рассмотрены три возможных варианта методики математического моделирования с использованием экспериментальных данных. В проекте RACUN использовалась методика, представленная на рис. 4. Существенно, что она использовалась в конкретном проекте и показала свою эффективность. Представляется целесообразным рассмотреть ее подробнее.



а) Формирование базы моделей канала



б) Оценка функциональных параметров протокола

Рис. 4. Методика математического моделирования

Полученные участниками проекта экспериментальные данные обрабатывались с помощью единого подхода. Возможные подходы к созданию модели канала с использованием симулятора «Mime channel simulator» рассмотрены в [10]. Этот симулятор строит модель в виде импульсной характеристики канала, полученной в результате статистической обработки набора экспериментальных данных.

Кратко рассмотрим ключевые понятия, которые представляются важными для понимания методики разработки протоколов в проекте RACUN.

Для построения динамической модели канала и ее дальнейшего использования применялась следующая модель:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{h}(t, \tau)x(t - \tau)d\tau + n(t) \quad (3)$$

где  $x(t)$  – сигнал на входе в канал;  $y(t)$  – сигнал на выходе из канала;  $n(t)$  – шум в канале;  $\hat{h}(t, \tau)$  – импульсная характеристика канала (TVIR – time-varying response).

С помощью симулятора канала «Mime channel simulator» путем статистической обработки данных получались оценки параметров для описания функции  $\hat{h}(t, \tau)$ . Далее набор моделей для разных условий описания используется при математическом моделировании.

После второго этапа проекта усилиями его участников была создана база из 60 моделей для разных типов сигналов и гидроакустических каналов разных регионов и разных условий. Спектр моделей включает в себя модели для многолучевого распространения, наличия доплеровского эффекта, нестабильность платформы и т.п.

Естественно, что исходные экспериментальные данные и модели были доступны всем исследовательским группам, участвующим в проекте. Общая схема методики моделирования приведена на рис. 4.

Библиотека моделей каналов использовалась при исследовании канального уровня протокола для частотного диапазона 4-8 кГц, специфицированного для проекта RACUN. При этом, в том числе использовались также модели цветного [14], а не только гауссового шума. Т.к. проект базировался на экспериментальных данных, то это обстоятельство является важным. Наиболее распространенные модели шумов: белый, розовый, красный (коричневый), пурпурный и серый. Они отличаются характером распределения энергии по частотам. Данных о типе цветного шума, использованного при моделировании при разработке протоколов для проекта RACUN, в открытых публикациях не приводится.

В качестве возможного варианта можно предположить, что естественным является использование розового шума. Для этого типа шума спектральная плотность мощности обратно пропорциональна частоте:

$$S(f) \sim 1/f \quad (4).$$

В этом заключается его отличие от белого (гауссового) шума, когда спектральная плотность мощности равномерно распределяется по всем частотам. Тем самым в сравнении с белым шумом его интенсивность увеличивается для низких частот. По аналогии со светом, где красный цвет соответствует малым частотам, шум с обратной пропорциональной зависимостью спектральной плотности от частоты называют розовым.

Количественно этот тип шума можно описать следующими правилами:

- каждый интервал октавы несет равное количество мощности шума;

▪ спектральная плотность мощности по сравнению с белым шумом затухает на 3 децибела на каждую октаву.

Существенно, что такой тип шума является одним из самых распространённых в биологических системах, а также практически в любых электронных и механических устройствах.

### Протокол GUWMANET

Протокол GUWMANET является в значительной мере специализированной версией стека протоколов MANET [11]. Эти протоколы предназначены для сетей сотовой связи и относятся к классу потоковых.

Передача данных по подводному акустическому каналу имеет принципиальное отличие от радиоканала. Это отличие заключается в скорости передачи данных по радио и гидроакустическим каналам. На расстоянии между узлами в 10 км задержка составляет 6-7 сек. В результате учета ряда ограничений протокол GUWMANET реализует специализированный метод передачи данных в виде коротких пакетов. Длина пакета составляет 128 бит плюс 10 служебных битов. Пакет передается за 0.3 сек.

Еще одним существенным ограничением является нелинейность среды передачи применительно к несущей частоте. Существенное поглощение высокочастотной составляющей привело разработчиков к необходимости использования частотного диапазона 3,5–7,5 кГц, который считается оптимальным применительно к специфицированным в проекте RACUN параметрам. Как следствие, появляются существенные ограничения на максимальную скорость передачи данных. Отсюда в свою очередь возникают ограничения на количество узлов в сети.

В настоящее время разработано много подходов к маршрутизации пакетов в таких сетях для подводных приложений. Эффективность того или иного решения существенно образом зависит от учета специфики применения. В настоящее время не представляется возможным выделить универсальный подход, обеспечивающий существенно лучшие функциональные параметры.

В силу этого представляется полезным рассмотреть концептуальные решения, наработанные в проекте RACUN. Конкретнее речь идет о механизмах маршрутизации пакетов, проверенных в условиях натуральных экспериментов.

### Базовая структура пакета данных

Специфика организация работ по проекту оказала влияние на ключевые уровни протокола, который в конечном счете использовался в заключительной серии испытаний.

В соответствии со спецификацией на систему RACUN ее аппаратный состав являлся разнородным. При этом компоненты разрабатывали и испытывали несколько команд разработчиков из разных стран. К моменту начала работ по проекту эти команды хоть и работали в смежных областях, но использовали собственные подходы и решения. Как следствие, при интеграции в единый проект требовалось обеспечить информационную совместимость разнородных узлов.

Для этого был разработан специализированный язык GUWAL [8]. Язык предназначен для описания

алгоритмов уровня приложений. По замыслу разработчиков это должно было обеспечить быструю и экономную реконфигурацию, как отдельных компонент, так и системы в целом.

Информационный обмен между узлами осуществляется с использованием 4 типов сообщений:

1. Запрос данных;
2. Данные (данные с датчиков, состояние узла, GPS координаты);
3. Команды управления (sleep, move, change mode);
4. Текстовые сообщения (SMS).

Язык использует унифицированную структуру пакета данных. Размер базового пакета данных составляет 128 бит, но при этом имеется возможность его изменения. Структура базового пакета данных, специфицированная в языке GUWAL, представлена в табл. 4.

Таблица 4.

Формат пакета данных для протокола языка GUWAL

| Номера битов | Длина | Назначение поля  |
|--------------|-------|--|
| 1-2          | 2     | Parcel Type (тип сообщения)  |
| 3            | 1     | End-to-End Acknowledgment (управление подтверждением)                |
| 4            | 1     | Priority Flag (приоритет)  |
| 5-10         | 6     | Operational Source Address (операционный адрес узла отправителя)     |
| 11-16        | 6     | Operational Destination Address (операционный адрес узла получателя) |
| 17-112       | 96    | Payload (данные)   |
| 113-128      | 16    | Checksum (контрольная сумма)   |

В принципе, это стандартная структура для сетей с небольшим объемом передаваемых данных. Отличием является крайне экономное расходование битов, что связано с учетом специфики гидроакустического канала.

Заголовок пакета включает в себя операционные адреса передающего и приемных узлов. Операционные адреса имеют длину 6 бит. При этом первые два бита определяют тип узла. При этом предполагается использование 4 типов узлов:

1. узел-ретранслятор (Gateway Node), буй или корабль с гидроакустическим и радиоканалом;
2. придонный узел (Bottom Node), узел с датчиками физических полей или узел-ретранслятор по гидроакустическому каналу;
3. мобильный узел (Mobile Node), водолаз, АНПА, подводная лодка;
4. поверхностный или воздушный узел (Surface and Air Nodes), узел только с радиоканалом.

Соответственно, последние четыре бита являются идентификатором узла конкретного типа. Использование четырех 0 означает широковещательную посылку для всех узлов данного типа. Наличие четырех 1 означает широковещательную посылку для всех узлов сети, вне зависимости от их типов.

С учетом этого максимальное количество узлов в группах 1-3 составляет 15 и 14 в группе 4. Таким образом, протокол имеет ограничение на суммарное количество узлов в сети, которое равно 59.

Следует отметить, что пакет данных языка GUWAL поддерживает возможность посылки пакетов

подтверждения узлами получателями. При этом обеспечивается возможность управления этой опцией за счет бита End-to-End Acknowledgment. Это представляется важной особенностью, например, при рассылке широковещательных сообщений. В этом случае получение подтверждений от всех узлов с учетом особенностей сети приведет к большим задержкам.

**Формат пакета данных протокола GUWMANET**

Исходная спецификация проекта подразумевала передачу пакетов между уровнями, состав которых фиксирован. На третьей стадии проекта исследовались свойства протокола GUWMANET. Это потоковый протокол для передачи данных при динамическом характере изменения состава узлов. Протокол реализует ряд концептуальных идей стека протоколов для сотовых сетей MANET. Эта связь нашла свое отражение в названии протокола.

Протокол GUWMANET обеспечивает возможность реконфигурирования состава уровней сетей за счет перехода узла из одного уровня сети в другой. Для этого потребовалось ввести механизм локальных адресов, который позволяет описать текущую конфигурацию сети.

На уровне реализации это означает, что набор локальных имен не является определенным заранее. Платой за это является необходимость введения процедуры инициализации узлов путем присвоения им локальных имен. С практической точки зрения это целесообразно, т.к. при проведении экспериментов позволило использовать разные по типу устройства на разных уровнях.

Для формирования текущего описания состава уровня сети используется особый тип пакетов данных на основе базовой структуры пакета GUWAL. При этом назначение ряда полей была модифицировано. Формат пакета данных GUWMANET, для назначения локальных имен приведен в табл. 5.

**Локальная адресация узлов**

При динамически изменяемой топологии сети в ней нет ведущего (master) устройства и узлы самостоятельно назначают себе локальные имена. Эти имена представляют собой цифровые индикаторы и назначаются самими узлами. Естественным требованием к выбору такого идентификатора является требование уникальности для трех уровней сети: собственного и уровней выше и ниже собственного.

Для этого был введен локальный адрес из 5 бит, который используется вместе с сетевым адресом. Локальный адрес не зависит от сетевого адреса и типа узла. Для обозначения локального адреса разработчики используют термин nickname. В силу того, что буквальным переводом этого термина «прозвище», далее будет использоваться термин «локальное имя».

Таблица 5.

**Формат пакета данных для назначения локальных имен (Nickname Notification) протокола GUWMANET**

| Номера битов | Длина | Назначение поля  |
|--------------|-------|--|
| 1-2          | 2     | Parcel Type (тип сообщения)  |
| 3            | 1     | End-to-End Acknowledgment (управление подтверждением)  |
| 4            | 1     | Priority Flag (приоритет)  |
| 5-10         | 6     | Operational Source Address (операционный адрес узла отправителя)   |
| 11-16        | 6     | Operational Destination Address (операционный адрес узла получателя, для широковещательной рассылки 11111 <sub>B</sub> ) |
| 17-20        | 4     | Data Type – Network Control (тип данных и управление сетью)  |
| 21-23        | 3     | Network Control Type –NN (тип управления сетью)  |
| 24-42        | 19    | Timestamp (временная отметка)  |
| 43-92        | 50    | Nicknames of 10x1-hop Neighbors (локальные имена узлов соседних уровней)   |
| 93-108       | 16    | MAC (own-address) (собственный адрес узла)   |
| 109-111      | 3     | Не используются  |
| 113-128      | 16    | Checksum (контрольная сумма)   |

Для того, чтобы уменьшить объем информационного обмена и затраты энергии на эту процедуру назначения локальных имен использован оригинальный подход.

Идея заключается в прослушивании узлом обмена в сети в течение некоторого времени T<sub>L</sub> трафика в сети. За это время узлом формируется список уже имеющихся локальных имен. При этом важно, что структура пакета GUWMANET помимо локального имени передатчика содержит и локальное имя с уровня, откуда ведется ретрансляция. По истечении времени T<sub>L</sub> узел генерирует случайным образом свое локальное имя. Естественно, что оно генерируется с учетом таблицы уже используемых локальных имен на трех уровнях сети: собственном и двух соседних.

Далее локальный адрес передается в пакете со специальной структурой. В протоколе GUWAL зарезервирован специальный тип данных для такого рода операций. Для этого используется механизм широковещательной рассылки.

Использование механизма локальной адресации в таком виде в общем случае требует процедуры описания начальной конфигурации сети в виде набора узлов. Это описание включает в себя типы узлов и их начальные локальные адреса. Протокол предусматривает возможность реинициализации сети с заданным периодом времени. Для этого используется поле Timestamp.

С практической точки зрения наличие локальных адресов обеспечивает возможность рассылки широковещательных сообщений не только по узлам заданного типа, но и по слоям сети. Более подробно детали реализации механизма локальной адресации описаны в [8].

### Механизм неявного подтверждения

Протокол GUEMANET использует модифицированный механизм неявного подтверждения (implicit acknowledgment - ACK). Этот механизм базируется на использовании специфицированной топологии сети, которая является многослойной. Идея механизма неявного подтверждения используется в модели сетевого обмена MANET.

Идея неявного подтверждения заключается в том, что узел отправитель имеет возможность контроля за ретрансляцией пакета соседних с ним слоев, путем прослушивания канала. Если узел отправитель не обнаружил перетрансляцию своего пакета он автоматически повторяет попытку послать пакет. При получении пакета узлом получателем он посылает подтверждение узлу ретранслятору из соседнего слоя, тем самым предотвращая ситуацию закливвания.

Протокол GUEMANET использует модифицированный механизм неявного подтверждения, учитывающий возможность потери пакетов из-за нестабильности канала, например, по причине повышения уровня шума.

В случае фиксации ситуации с пересылкой пакета узел отправитель делает 5 повторных попыток с экспоненциально увеличивающейся временной задержкой. После этого считается, что передача данных этому узлу невозможна и он удаляется из списка абонентов. При этом также обновляется список возможных маршрутов передачи пакетов.

Применительно к многослойной сети оказалось целесообразным использовать механизм повторных запросов ARQ (Automatic Repeat reQuest). При использовании опции ACK принимающий узел посылает пакет с сообщением о получении узлу-отправителю. В случае отсутствия подтверждения в течение специфицированного времени, посылка исходного пакета повторяется в автоматическом режиме. В терминах модели OSI речь идет об описании транспортного уровня протокола.

В настоящее время работа над усовершенствованиями протокола продолжается. В частности, речь идет о динамическом контроле возможных маршрутов доставки при восстановлении свойств фрагментов канала передачи. Кроме этого указывается на еще не опубликованный отчет, который описывает механизмы использования корректирующих ошибки кодов.

### Протокол Dflood

Первоначальная концепция протокола Dflood базировалась на идее использования допустимого времени для перетрансляции пакета. Для этого требуется иметь в пакете временной параметр.

Результаты испытаний показали, что для увеличения значения PDR (Packet Delivery Rate) требуется уменьшить дублирование посылок из одного уровня на соседние. Возможные варианты реализации протокола рассмотрены в [12]. Как следует из таблицы 3 использование этого протокола не обеспечило специфицированное значение PDR равное 0.9.

Тем не менее, работа над его совершенствованием продолжается. В работе [13] описаны алгоритмы исходной версии Dflood и ряд

модификаций этого протокола: GDflood, Dflood-ACK, GDflood-ACK, NC-Dflood, NC-GDflood. Эта работа представляет определенный интерес, т.к. в ней описывается не только методика разработки, а приводятся результаты моделирования.

В версиях протокола NC-Dflood реализуется механизм перенумерации пакетов. Для его обозначения разработчики ввели понятие - сетевое кодирование (NC-Network Coding).

Суть заключается в том, что пакетам присваиваются динамически изменяемые номера. Каждому пакету присваивается уникальный последовательно возрастающий номер. Анализ его значения позволяет избежать повторной посылки пакета. Когда узел имеет пакет для пересылки, он присваивает ему номер 1 и активирует MAC уровень протокола.

Номер принятого пакета перед отправкой анализируется узлом и с использованием определенных правил модифицируется. При анализе и присвоении нового номера пакету используется буферизованные данные о номерах ранее полученных и отправленных пакетов. Естественно, узлу доступны данные об узлах отправителях и получателях пакетов.

При получении пакета узлом дальнейшая пересылка осуществляется с временной задержкой, значение которой определяется временным интервалом  $[T_{min}, T_{max}]$ . Пакеты с одинаковыми номерами считаются дублированными. Соответственно, узел не осуществляет их повторную посылку.

При этом ведется анализ и подсчет номеров пакетов, которые превышают по значению уже отправленные пакеты. Если номер пакета меньше, то он становится в очередь на пересылку. При этом его номер увеличивается.

Важно подчеркнуть, что при математическом моделировании существенным образом используются данные с натуральных экспериментов с проекта RACUN.

### Придонный сенсорный узел NILUS (MK2)

Норвежский центр оборонных исследований (Norwegian Defense Research Establishment) FFI принимал участие в проекте RACUN. Представляется полезным рассмотреть концептуально перспективные подходы, которые развиваются этой группой исследователей.

Проведение натурных испытаний является совершенно необходимым этапом при разработке протоколов. Для подводных сетей стоимость проведения таких экспериментов существенно превышает стоимость аналогичных экспериментов для сетей на основе радиоканала. Важным обстоятельством является то, что этот проект относится к классу НИОКР. Соответственно, это означает необходимость обеспечить возможность быстрой и дешевой модификации аппаратно-программных решений как в части функциональных возможностей узлов, так и в части реализации каналообразующей аппаратуры. При таком подходе оптимизации стоимость конкретного узла отходит на второй план и требуются по возможности универсальные решения.

Концепция разработки компактного сенсорного узла для научных исследований в области

гидроакустических применений предложена в работе [14]. Эта концепция получила практическое применение в ряде оборонных R&D проектов. В том числе узлы NILUS использовались в исследовательском проекте NATO Joint Research Project NGAS (Next Generation Autonomous Systems).

Следует отметить, что из-за быстрого развития терминология еще не устоялась и используемая ниже терминология заимствована из первоисточников.

В работе [7] рассматривается класс программно-конфигурируемых модемов (Software-Defined Underwater Acoustic Modems). Сокращенное название этого класса модемов - SDM (Software-Defined Modems). В идеале модемы этого класса должны обеспечить возможность описания разных вариантов реализации всех уровней протокола программным способом. Соответственно, реализация такого рода каналообразующей аппаратуры подразумевает существенную избыточность по аппаратной реализации, в том числе и из-за необходимости иметь запас по скорости обработки в режиме реального времени.

В проекте RACUN использовался придонный сенсорный узел NILUS (Networked IntelLigent Underwater Sensors), разработанный FFI. Разработка узлов NILUS изначально ориентировалась на реализацию концепции SDM подхода. Суть заключается в максимальном использовании программно-определяемых реализаций за счет использования мощного микроконтроллерного ядра и отказа от специализированных решений на базе DSP и FPGA.

На первых этапах использовалась версия NILUS (МК1). При выборе архитектурных решений предпочтение отдавалось универсальности в части возможности реализации как разных протоколов обмена, так модификации подводных узлов за счет добавления новых функциональных возможностей. При этом должна быть обеспечена возможность программной модификации всех составляющих компонент каналообразующего оборудования.

Эти решения были разработаны в рамках второго этапа проекта NILUS и протестированы в натурных условиях в составе системы на третьем этапе.

### Аппаратно-программная архитектура SDOAM

Для расширения возможностей узла в части наращивания номенклатуры сенсорных элементов оказалось необходимо использование концепции SDOAM (Software-Defined Open Architecture Modem).

На третьем этапе проекта RACUN было использовано 4 погружных стационарных узла. Два из них дополнительно снабжались пассивными акустическими и магнитными датчиками, платой расширения с сигнальным процессором и встроенным бортовым компьютером с операционной системой Linux. Два других узла использовались только для сбора акустических данных.

Аппаратная компонента модема NILUS (МК2) реализована на плате Variscite System-on-Module VAR-SOM-OM44. Она реализована на основе двух ядерного микроконтроллера OMAP4460 (Texas Instruments). Это 32 битный микроконтроллер с архитектурой Dual-Core ARM Cortex-A9 и максимальной частотой 1.5 ГГц [15].

Предельные возможности такого решения обеспечивают быстроедействие в 7500 MIPS при наличии 1 Гбит RAM и малогабаритного внешнего накопителя в виде 8 Гбит MicroSD. Плата VAR-SOMOM44 имеет в составе 8-канальный аудиокодек TWL6040 [16].

На рис. 5 показана программно-аппаратная архитектура коммуникационной компоненты, обеспечивающая проверку возможности реализации концепции SDOAM на практике.

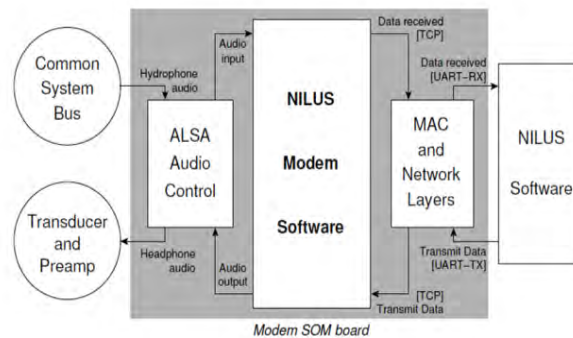


Рис. 5. Аппаратно-программная архитектура SDOAM узла NILUS

Она включает в себя блоки модуляции и демодуляции (PHY), которые информационно взаимодействуют с уровнями MAC и NET с использованием стандартного протокола TCP.

Буферизованный информационный обмен между блоком PHY, трансдьюсером и преамплификатором осуществляется с использованием драйвера ALSA (Advanced Linux Sound Architecture) для интегрированной в SOM аудио карты.

Данные от преамплификатора гидрофонов поступают по CSB (Common System Bus). Это цифровая шина и данные на ней представляются в доступном для аудио карты ALSA формате PCM. Это обеспечивает возможность использования штатного драйвера для нее.

Уровень NET и уровень приложений «NILUS Software» реализованы на разных платах. Информационный обмен между ними осуществляется посредством UART интерфейса.

### Протокол NILUS МК 2

В протоколе МК 2 используется когерентный метод многочастотного кодирования FRSS, описанный в работах [17], [18].

Этот метод разработан и экспериментально исследован в рамках исследовательского проекта «UUV Covert Acoustic Communications». Проект реализовывался с участием исследователей Дании, Финляндии, Италии, Нидерландов, Германии, Норвегии и Швеции.

Целью этого проекта являлось исследование методов надежной передачи телеметрических данных по гидроакустическому каналу в прибрежной зоне. На первой фазе этого проекта в 2006 г. собирались экспериментальные данные об особенностях гидроакустического канала в Балтийском и Северных морях. Эксперименты фокусировались на изучении особенностей шумов окружающей среды, многоканальном распространении, доплеровском эффекте и временных изменениях параметров канала. Эти

данные были использованы при разработке алгоритмов для реализации надежной и скрытой передачи данных.

При использовании этого метода биты полезной нагрузки передаются обрамленные обучающими последовательностями битов (в оригинале training bits). Для детектирования сигнала используется битовая последовательность с предопределенной максимальной длиной. Результирующий битовый поток при этом передается с использованием нескольких частот и фазово-манипулированной модуляции.

Т.к. в каждом поддиапазоне передается одна и та же символьная последовательность эта совокупность данных позволяет выполнить их сравнение. В работе описан адаптивный многочастотный эквалайзер (в оригинале adaptive multiband equalizer). Он использует итеративный алгоритм для увеличения эффективности приемника. Этот алгоритм тестировался с использованием акустических данных для Балтийского моря и использовании 8 субдиапазонов по 460 Гц каждый. Скорость передачи составила 75 бит/сек. Данные передавались при уровне шумов до -12 дБ по трем разным каналам, что соответствует уровню SNR на бит  $E_b/N_0 = -5$  дБ.

В работе [15] приводятся данные о том, что в натурном эксперименте была продемонстрирована возможность надежной передачи данных между кораблем-маткой и АНПА (Автономный Необитаемый Подводный Аппарат) на расстояниях до 50 км.

Протокол NILUS MK 2 использует линейный многоканальный эквалайзер для обработки данных с нескольких частотных субдиапазонов. Параметры фильтра подстраиваются с использованием метода наименьших квадратов (LMS – Least Means Squares) и алгоритма Viterbi для декодирования.

Алгоритм Viterbi — алгоритм поиска наиболее вероятной последовательности событий для процессов, которые могут быть описаны цепью Маркова. Относится к классу алгоритмов динамического программирования. Был предложен Витерби в 1967 г. для декодирования сверточного кода, передаваемого по сетям с наличием шумов. Этот алгоритм широко используется в стандартах передачи данных GSM и CDMA и сетях стандарта 802.11.

Алгоритм базируется на следующих предположениях:

- наблюдаемые и скрытые события должны быть упорядоченной по времени последовательностью;
- две последовательности должны быть выровнены: каждое наблюдаемое событие должно соответствовать ровно одному скрытому событию;
- вычисление наиболее вероятной скрытой последовательности до момента времени  $t$  должно

зависеть только от наблюдаемого события в момент времени  $t$ , и наиболее вероятной последовательности до момента  $(t - 1)$ .

В протоколе NILUS MK 2 используется метод оценки для SNR, которая требуется для вычисления вероятности наличия бита, которая используется для реализации декодера Viterbi. Из этого краткого описания следует, что современные алгоритмы требуют значительных вычислительных ресурсов.

### Заключение

Представленный материал позволяет выделить ключевые задачи для развития научно-технического задела в области гидроакустических средств связи.

1. Для того чтобы наладить возможность обмена экспериментальными данными между группами отечественных разработчиков требуется тем или иным способом унифицировать модели описания гидроакустического канала.

Работа в этом направлении должна иметь в качестве основной цели разработку, по крайней мере, одного симулятора гидроакустического канала. В качестве первого шага представляется разумным использование опыта разработки свободно распространяемого симулятора Watermark 1.0 [19], разработанного FFI (Норвегия).

Этот симулятор обеспечивает возможности тестирования и разработки протоколов для передачи данных по гидроакустическому каналу. Он представляет собой программную оболочку в среде MATLAB на основе симулятора канала Mime, также разработанного FFI [9]. В настоящее время включает 5 моделей каналов для разных условий.

2. Для проведения натурных исследований с целью как накопления экспериментальных данных для формирования моделей каналов, так и проведения натурных экспериментов с конкретной каналобразующей аппаратурой требуется разработка комплекта экспериментального оборудования.

Использование концепции SDOAM (Software-Defined Open Architecture Modem) представляется наиболее перспективным. Как следует из результатов обзора [20] состояния отечественной элементной базы такой узел может быть реализован на современных отечественных микроконтроллерах второго поколения.

3. Для выработки плана развития по данному направлению важно отслеживать результаты проекта DUSN (Distributed Underwater Sensor Networks), реализуемого в кооперации исследовательских групп Канады, Норвегии и Швеции [5]. Этот проект является естественным продолжением проекта RACUN и существенным образом базируется на его результатах.

### Литература

1. Khalid Mahmood Awan, Peer Azmat Shah, Khalid Iqbal, Saira Gillani, Waqas Ahmad, Yunyoung Nam. "Underwater Wireless Sensor Networks: A Review of Recent Issues and Challenges". Hindawi, Wireless Communications and Mobile Computing. Volume 2019, Article ID 6470359, 20 pages.
2. Chaima Zidi. "Energy efficient underwater acoustic sensor networks". Networking and Internet Architecture . Université Sorbonne Paris Cité, 2018.
3. Akyildiz, D.Pompili, T.Melodia. "Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks". ACM Sigbed Review, 1(2):3–8, 2004.



4. P.Casari, J. Kalwa at all. "Security via Underwater Acoustic Networks: the Concept and Results of the RACUN Project". Conference Paper JNIC2015, September 2015.
5. R.Otnes and all. "Distributed fusion in underwater sensor networks: Fusing bearing information". Underwater Acoustics Conference & Exhibition (UACE) 2019, s. 809-816.
6. C. Tapparello, P. Casari, G. Toso, I. Calabrese, R. Otnes, P.V. Walree, M. Goetz, I. Nissen, M. Zorzi. "Performance Evaluation of Forwarding Protocols for the RACUN Network". WUJNET 13, November 11–13 2013, Kaohsiung, Taiwan.
7. H. Dol, P. Casari, T. Zwan, R. Otnes. "Software-Defined Underwater Acoustic Modems: Historical Review and the NILUS Approach". IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 42, no. 3, pp. 722-737, Jul. 2017.
8. M. Goetz and I. Nissen, "GUWMANET – multicast routing in underwater acoustic networks". Conference: Communications and Information Systems Conference (MCC), Gdansk, Poland, Oct. 2012.
9. R. Otnes and all. "Peer-Reviewed Technical Communication Underwater Acoustic Network Simulation With Lookup Tables From Physical-Layer Replay". IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 40, no. 4, Oct. 2015
10. R. Otnes, P. A. van Walree, and T. Jenserud, "Validation of replay-based underwater acoustic communication channel simulation". IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 38, no. 4, pp. 689–700, Oct. 2013.
11. The official IETF MANET working group webpage. <http://www.ietf.org/html.charters/manetcharter.html>
12. R. Otnes and S. Haavik, "Duplicate reduction with adaptive backoff for a flooding-based underwater network protocol," in *Proc. MTS/IEEE OCEANS*, Bergen, Norway, Jun. 2013.
13. Elvin Isufi, Henry Dol, Geert Leus. "Advanced flooding-based routing protocols for underwater sensor networks". EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016.
14. R. Otnes, "NILUS – An Underwater Acoustic Sensor Network Demonstrator System," 10th Int. Mine Warfare Techn.Symp., Monterey, CA, USA, May 2012.
15. Variscite LTD. "VAR-SOM-OM44 V1.1 Datasheet Texas Instruments OMAP4TM -based System-on-Module", accessed: September 2021. [Online]. Available: [https://variscite.ru/docs/datasheets/VAR-SOM-OM44\\_v1.1\\_datasheet\\_v1.2.pdf](https://variscite.ru/docs/datasheets/VAR-SOM-OM44_v1.1_datasheet_v1.2.pdf)
16. Texas Instruments. "8-channel high-quality low-power audio codec for portable applications" accessed: September 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/TWL6040>
17. P. van Walree and G. Leus. "Robust underwater telemetry with adaptive turbo multiband equalization" IEEE Journal of Oceanic Engineering., vol. 34, no. 4, pp. 645–655, Oct. 2009.
18. P. van Walree, H. Buen, and R. Otnes, "A performance comparison between DSSS, M-FSK, and frequency-division multiplexing in underwater acoustic channels," in *Proc. UComms*, Sestri Levante, Italy, Sep. 2014.
19. The Watermark manual and user's guide version 1.0. accessed: September 2021. [Online]. Available: <https://www.ffi.no/en/research/watermark>
20. Астапкович А.М., Матвеев Д.П. Микроконтроллерные платформы «МИЛАНДР» и «МУЛЬТИКОР» // Компоненты и технологии, № 4, 2020, с.10-17.

#### References

1. Khalid Mahmood Awan, Peer Azmat Shah, Khalid Iqbal, Saira Gillani, Waqas Ahmad, Yunyoung Nam. "Underwater Wireless Sensor Networks: A Review of Recent Issues and Challenges". Hindawi, Wireless Communications and Mobile Computing. Volume 2019, Article ID 6470359, 20 pages.
2. Chaima Zidi. "Energy efficient underwater acoustic sensor networks". Networking and Internet Architecture . Université Sorbonne Paris Cité, 2018.
3. Akyildiz, D.Pompili, T.Melodia. "Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks". ACM Sigbed Review, 1(2):3–8, 2004.
4. P.Casari, J. Kalwa at all. "Security via Underwater Acoustic Networks: the Concept and Results of the RACUN Project". Conference Paper JNIC2015, September 2015.
5. R.Otnes and all. "Distributed fusion in underwater sensor networks: Fusing bearing information". Underwater Acoustics Conference & Exhibition (UACE) 2019, s. 809-816.
6. C. Tapparello, P. Casari, G. Toso, I. Calabrese, R. Otnes, P.V. Walree, M. Goetz, I. Nissen, M. Zorzi. "Performance Evaluation of Forwarding Protocols for the RACUN Network". WUJNET 13, November 11–13 2013, Kaohsiung, Taiwan.
7. H. Dol, P. Casari, T. Zwan, R. Otnes. "Software-Defined Underwater Acoustic Modems: Historical Review and the NILUS Approach". IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 42, no. 3, pp. 722-737, Jul. 2017.
8. M. Goetz and I. Nissen, "GUWMANET – multicast routing in underwater acoustic networks". Conference: Communications and Information Systems Conference (MCC), Gdansk, Poland, Oct. 2012.
9. R. Otnes and all. "Peer-Reviewed Technical Communication Underwater Acoustic Network Simulation With Lookup Tables From Physical-Layer Replay". IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 40, no. 4, Oct. 2015
10. R. Otnes, P. A. van Walree, and T. Jenserud, "Validation of replay-based underwater acoustic communication channel simulation". IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 38, no. 4, pp. 689–700, Oct. 2013.
11. The official IETF MANET working group webpage. <http://www.ietf.org/html.charters/manetcharter.html>
12. R. Otnes and S. Haavik, "Duplicate reduction with adaptive backoff for a flooding-based underwater network protocol," in *Proc. MTS/IEEE OCEANS*, Bergen, Norway, Jun. 2013.
13. Elvin Isufi, Henry Dol, Geert Leus. "Advanced flooding-based routing protocols for underwater sensor networks". EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016.
14. R. Otnes, "NILUS – An Underwater Acoustic Sensor Network Demonstrator System," 10th Int. Mine Warfare Techn.Symp., Monterey, CA, USA, May 2012.

15. Variscite LTD. "VAR-SOM-OM44 V1.1 Datasheet Texas Instruments OMAP4TM -based System-on-Module", accessed: September 2021. [Online]. Available: [https://variscite.ru/docs/datasheets/VAR-SOM-OM44\\_v1.1\\_datasheet\\_v1.2.pdf](https://variscite.ru/docs/datasheets/VAR-SOM-OM44_v1.1_datasheet_v1.2.pdf)
16. Texas Instruments. "8-channel high-quality low-power audio codec for portable applications" accessed: September 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/TWL6040>
17. P. van Walree and G. Leus. "Robust underwater telemetry with adaptive turbo multiband equalization" IEEE Journal of Oceanic Engineering., vol. 34, no. 4, pp. 645–655, Oct. 2009.
18. P. van Walree, H. Buen, and R. Otnes, "A performance comparison between DSSS, M-FSK, and frequency-division multiplexing in underwater acoustic channels," in Proc. UComms, Sestri Levante, Italy, Sep. 2014.
19. The Watermark manual and user's guide version 1.0. accessed: September 2021. [Online]. Available: <https://www.ffi.no/en/research/watermark>
20. Astapkovich A.M., Matveev D. P. "Mikrokontrollernye platformy «MILANDR» i «MUL'TIKOR»". Komponenty i tekhnologii, № 4, 2020, с.10-17. [Microcontroller platforms "MILANDR" and "MULTICOR". Components and technologies, № 4, 2020, с.10-17].

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

**Александр Михайлович Астапкович**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники, ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 198514, г. Санкт-Петербург, ул. Разводная, д. 15, e-mail: [tatalex2@gmail.com](mailto:tatalex2@gmail.com).

**Alexander M. Astapkovich**, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Radio Electronics, VMPI VUNC VMF VMA, Razvodnaya, 15, St. Petersburg, 198514, Russian Federation, e-mail: [tatalex2@gmail.com](mailto:tatalex2@gmail.com).

**Игорь Владиленович Кожемякин**, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [1861vp@mail.ru](mailto:1861vp@mail.ru).

**Igor' V. Kozhemyakin**, St. Petersburg State Marine Technical University, Locmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [1861vp@mail.ru](mailto:1861vp@mail.ru).

**Таисия Константиновна Шарафутдинова**, преподаватель кафедры радиоэлектроники, ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 198514, г. Санкт-Петербург, г. Петергоф, ул. Разводная, д. 15, e-mail: [sharafutdinova.taya@yandex.ru](mailto:sharafutdinova.taya@yandex.ru).

**Taisiia K. Sharafutdinova**, Lecturer of the Department of Radio Electronics, VMPI VUNC VMF VMA, Razvodnaya, 15, St. Petersburg, 198514, Russian Federation, e-mail: [sharafutdinova.taya@yandex.ru](mailto:sharafutdinova.taya@yandex.ru).

**Алексей Сергеевич Шустов**, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [semte@semte.ru](mailto:semte@semte.ru).

**Aleksey S. Shustov**, St. Petersburg State Marine Technical University, Locmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [semte@semte.ru](mailto:semte@semte.ru).

Статья поступила в редакцию 16.10.2021; одобрена после рецензирования 26.01.2022, принята к публикации 26.02.2022

The article was submitted 16.10.2021; approved after reviewing 26.01.2022; accepted for publication 26.02.2022



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE  
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173  
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3  
**e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru**

---

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ  
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА  
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте **www.morintex.ru**
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу **mit-journal@mail.ru** (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

**Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».**

На страницах журнала публикуются **НОВЫЕ** научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является **основным требованием к статьям.**

Каждая статья, принятая редколлекцией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлекция не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставяемому по запросу счету.**

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала  
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

**д.т.н. проф. Никитин Н.В.**

**Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ**

**Гайкович А.И.**

**Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

**Архипов А.В., Рыбников Н.И.**

**Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

**Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

**Шауб П.А.**

**Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

**Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

**Гайкович А.И.**

**Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**