

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1101001001001000101010101110101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)  
 0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)  
 10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110  
 00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100  
 001101010011010010000101101001010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101  
 11011100110010101111001010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010  
 00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001  
 11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100  
 001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



№ 3 Часть 1 2022  
№ 3 Part 1 2022

Morskie intelektual 'nye tehnologii



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010  
 1100101111000100110000110110111011010001001101001110010001010010101000110101110100001  
 010100011011101001000100111011000010110011101001110100110001010101101010010011001110  
 110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001  
 10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010  
 01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 часть 1 2022 Сквозной номер 57

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 наук, в международную реферативную базу данных Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase.**

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

### Рубрики журнала

Проектирование и конструкция судов;

Теория корабля и строительная механика;

Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;

Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные);

Информационно-измерительные и управляющие системы;

Системный анализ, теоретические основы информатики;

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;

Математическое моделирование и численные методы.

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

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

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

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

бесплатный звонок по России 8 800 201 3897

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ».

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ».

Тираж 100 экз.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2022



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 3 part 1 2022 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

## ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

### Journal headings:

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

### The journal is coming since 2008

#### Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index 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 им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург

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

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

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

## **Члены Редколлегии**

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

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

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

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

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

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

И.И. Костылев, д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург

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

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

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

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

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

## **Редакционный Совет**

### **Сопредседатели**

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

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

## **Члены Совета**

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

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

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

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

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

Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и 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 Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

A.I. Frumen, PhD (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
P.A. Shaub, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, St. Petersburg, Russia  
Sergey N. Ryumin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

### **Members of Editorial Staff**

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

V.Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
N.A. Taranukha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

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

## **Editorial Board**

### **Co-chairmen**

I.G. Zakharov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz", St. Petersburg, Russia

G.A. Turichin, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

### **Council Members**

E.M. Appolonov, Dr. Sci. (Eng.), General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Nizhny Novgorod, Russia

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

G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), CEO, 51 CCIS, St. Petersburg, Russia

D.V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Research, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

S.A. Ogai, Doctor of Engineering, Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

K.V. Rozhdestvenskij, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

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

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Олег Николаевич Петров**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Михаил Владиленович Войлошников**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Юрий Яковлевич Фершалов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Евгений Петрович Бураковский**, доктор технических наук, профессор, филиал Военно-морской академии в г. Калининград
- **Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Сергей Петрович Марков**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Олегович Токарев**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Виктор Михайлович Амбросовский**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
- **Александр Николаевич Минаев**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова
- **Виктор Анатольевич Кулеш**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Виктор Иванович Гнатюк**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Андрей Евгеньевич Пластинин**, доктор технических наук, доцент, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Гальцов Игорь Александрович**, кандидат технических наук, доцент Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
- **Анатолий Владимирович Алексеев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор Дагестанский государственный технический университет

- **Сергей Николаевич Павликов**, кандидат технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Светлана Владимировна Лисиенко**, кандидат экономических наук, доцент, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Игорь Григорьевич Захаров**, доктор технических наук, профессор, ЦМКБ «Алмаз»
- **Сергей Владимирович Антоненко**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Андрей Борисович Фомичев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Абдурашид Яруллаевич Яфасов**, доктор технических наук, Калининградский государственный технический университет
- **Виктор Викторович Митропов**, кандидат военных наук, ведущий специалист, Научный центр по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации

**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
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Michael V. Voyloshnikov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Yuri Ya. Fershalov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern Federal University
- **Evgeny P. Burakovskiy**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Kaliningrad branch of Naval Academy
- **Sergei V. Chekhranov**, **Dr. Sci. (Eng), Professor**, Far Eastern State Technical Fisheries University
- **Sergej P. Markov**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Aleksandr O. Tokarev**, Dr.Sci. (Eng), associate professor, Siberian state university of water transport
- **Viktor M. Ambrosovsky**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"
- **Alexander N. Minaev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern Federal University
- **Gennadiy P. Kicha**, Dr. Sci. (Eng), professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Stepan Yu. Malamanov**, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinov
- **Victor A. Kulesh**, Dr. Sci. (Eng), professor, Far Eastern Federal University
- **Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Siberian state University of water transport
- **Victor I. Gnatyuk**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Kaliningrad state technical university
- **Andrey E. Plastinin**, Dr. Sci. (Eng), assistant professor, Volga State University of Water Transport
- **Igor A. Galtsov**, PhD (Eng), assistant professor Northern (Arctic) Federal University
- **Anatoliy V. Alexseev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Alexander A. Rodionov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Dagestan State Technical University
- **Sergej N. Pavlikov**, Ph.D. (Eng), Professor, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University
- **Svetlana V. Lisienko**, Ph. D. (Econ), Associate Professor, Far Easten state technical fishery University
- **Igor G. Zakharov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, ZMKB "Almaz"

- **Sergey V. Antonenko**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern Federal University
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Andrej B. Fomichev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Abdurashid Y. Yafasov**, Dr. Sci. (Eng), Kaliningrad State Technical University
- **Viktor V. Mitropov**, PhD (Def), leading specialist, Federal Ministry of Transport's Budgetary Institution Research and Analysis Centre for Integrated Transport Solutions



# 51 центральный конструкторско - технологический институт судоремонта

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

<b>Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В., Львова Е.Е., Сысенко В.В., Аскарров Д.В.</b> Экспериментальные исследования геометрических и силовых характеристик моделей разноглубинного трала в гидроканале «Фишеринг Сервис».....	16
<b>Франк М.О., Овчинников К.Д., Рыжов В.А.</b> Обзор российского и зарубежного опыта создания безэкипажных катеров.....	22
<b>Огай С.А., Войлошников М.В., Огай А.С.</b> Методические противоречия критериев затрат и показателей, связанных с прибылью, при их использовании на начальных стадиях проектирования судов и применение показателя в форме вклада морских ресурсов.....	29
<b>Кулеш В.А., Фам Чунг Хиеп</b> Исследования напряженно-деформированного состояния днища с учетом внешней конструктивной защиты от грунта.....	37

### ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

<b>Овчинников К.Д., Синишин А.А., Белая А.Б., Рыжов В.А.</b> Исследование влияния параметров рулевой системы на характеристики управляемости волнового глайдера.....	44
<b>Гасникова А.С., Макарова В.В., Потехин Ю.П.</b> Расчетное исследование гидродинамических характеристик судового руля, расположенного за дейдвудом.....	50
<b>Борисов Р.В., Лузянин А.А.</b> Оценка мореходности судна на встречном нерегулярном волнении... ..	58
<b>Семенова В.Ю., Павлючук Н.А.</b> Определение дополнительного сопротивления, возникающего при качке судна в различных стесненных фарватерах.....	63
<b>Васьков А.С., Штанько А.Н., Еськова А.В.</b> Анализ процесса одерживания поворота судна.....	71
<b>Родионов А.А., Карпенко Е.А., Коршунов В.А.</b> Численное моделирование динамического процесса столкновения судов на основе связанной задачи движения одномерных моделей в жидкости.....	77

### ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

<b>Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Хекерт Е.В.</b> Динамика вибрационных воздействий на шлифовальный станок в условиях плавучей мастерской с учетом морского волнения.....	84
<b>Санников А.В., Стоянов Т.Ю., Ефремов А.К.</b> Экспериментальная оценка качества вальцованных соединений с различными типами уплотнений.....	94
<b>Фирсова А.В., Бачев А.С.</b> Анализ технологии ремонта корпуса судна из полимерных композиционных материалов.....	102

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

<b>Матвеев В.Т., Дологлонян А.В., Клименко А.Г.</b> Эффективность комбинированных газотурбинных установок на частичных нагрузках .....	109
<b>Туркин В.А., Стяжкин А.А., Загурский Е.Ф.</b> Управление безопасностью судовых энергетических установок на основе нечеткой логики.....	118
<b>Никущенко Е.А.</b> Вычисление числа Нуссельта для установившегося турбулентного неизотермического течения жидкости в трубе с постоянной плотностью теплового потока на стенке при использовании турбулентного числа Прандтля.....	124
<b>Пассар А.В., Тимошенко Д.В., Фершалов Ю.Я.</b> Оптимальные значения угла выхода потока из соплового аппарата радиально-осевой турбины в зависимости от режима ее работы.....	129
<b>Тарасов М.И., Кича Г.П., Надежкин А.В.</b> Расчетно-экспериментальное моделирование влияния угара смазочного масла на состояние судового тронкового дизеля.....	136

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

<b>Данцевич И.М.</b> Разработка малогабаритного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата гибридной компоновки.....	147
---	-----

<b>Лютикова М.Н.</b> Нейросетевой контроллер управления многоцелевым буксируемым комплексом с формированием нейронов в асимптотике полиномов Бернштейна.....	153
<b>Букин О.А., Коровецкий Д.А., Чехленок А.А., Проценко Д.Ю., Юрчик В.Ф., Кривотулов А.М., Пяк Е.А.</b> Разработка новой технологии мониторинга и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на морской поверхности с использованием беспилотных воздушных судов (БВС)..	160
<b>Шилин М.М.</b> Радиоканал в телеуправлении необитаемыми подводными аппаратами.....	170
<b>Проценко Д.Ю. Букин О.А., Чехленок А.А., Букин И.О., Коровецкий Д.А., Голик С.С., Соколова И.В., Надежкин А.В.</b> Разработка аппаратно-программных средств для мониторинга нефтяных загрязнений с возможностью интеграции на телеуправляемые необитаемые подводные аппараты..	175

### **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

<b>Мелехин В.Б., Хачумов М.В.</b> Принцип распознавания объектов проблемной среды в процессе планирования поведения автономной интеллектуальной мобильной системы.....	181
<b>Астреин В.В., Филатов В.И.</b> Положения и методы разработки автоматического мониторинга безопасности судоходства .....	188
<b>Васьков А.С., Мироненко А.А.</b> Сравнение методов сглаживания по данным эксперимента на модели.....	198
<b>Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б.</b> Обнаружение и идентификация малозумного движущегося источника на фоне шумов ближнего судоходства в мелком море.....	205
<b>Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Кузнецова Е.Ю.</b> Оценка экологической безопасности водной транспортировки грузов.....	212
<b>Лукомская О.Ю., Лукомский Ю.А., Шаталова Н.В.</b> Разработка основных принципов моделирования процессов формирования и обслуживания встречных транспортных потоков когнитивной транспортной системы внутренних водных путей.....	220
<b>Татаренков Д.А., Рогозинский Г.Г., Малыгин И.Г., Кутлыярова А.А.</b> Применение нейронной сети для синтеза дополнительных ракурсов в задаче построения виртуального пространства морского бортового тренажера.....	228
<b>Ушаков В.А.</b> Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов.....	235
<b>Бобрик П.П., Шаталова Н.В., Вислогузов В.В.</b> Механизмы регулирования и согласованного планирования китайского трафика в порты Западной Европы.....	248
<b>Фахми Ш.С., Королев О.А., Бородина О.В.</b> Новый алгоритм обнаружения и выделения морских объектов от фона в системах наблюдения.....	256
<b>Полковникова Н.А., Полковников А.К.</b> Применение генетических алгоритмов для решения транспортных задач.....	265
<b>Мелехин В.Б., Хачумов М.В.</b> Планирование поведения автономных интеллектуальных роботов в условиях с высоким уровнем априорной неопределенности.....	274
<b>Павликов С.Н., Копаева Е.Ю., Колесов Ю.Ю., Петров П.Н., Гареева М.А.</b> Метод мобильной радиосвязи .....	282

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

<b>Васьков А.С., Штанько А.Н.</b> Адаптивная модель движения судна в системах управления.....	288
<b>Тюленев К.Г.</b> Совершенствование транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок на основе водного транспорта при реализации стратегических целей транспортного комплекса.....	296
<b>Котенко А.Г., Малыгин И.Г., Королев О.А.</b> Когнитивный метод формирования модели мультимодального перевозочного процесса в универсальных перегрузочных комплексах крупных морских портов .....	302

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ**

<b>Абашкин Е.Е., Ткачева А.В.</b> Влияние предварительного подогрева пластины на значения и распределение остаточных напряжений, образованных в результате наплавки.....	310
--	-----

<b>Семенова В.Ю., Альбаев Д.А.</b> Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна в условиях мелководья.....	319
<b>Усольцев В.К., Чупина К.В.</b> Управляемый задатчик интенсивности в системах автоматического управления.....	328
<b>Старжинская Н.В., Чернова А.И.</b> Логико-вероятностное моделирование надежности удаленного автоматизированного радиотехнического поста Системы управления движением судов.....	333
<b>Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р.</b> Численное моделирование формирования разжимных соединений свай с основаниями морских стационарных платформ и их работоспособности.....	340
<b>Нечаев Ю.И., Никущенко Д.В.</b> Цифровые модели нестационарной динамики подводных объектов в среде «облачных» вычислений.....	346

CONTENTS	page
<b>DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS</b>	
<b>Alexander A. Nedostup, Alexey O. Razhev, Pavel V. Nasenkov, Ekaterina E. Lvova, Vladimir V. Sysenko, Dmitry V. Askarov</b> Experimental studies of geometric and force characteristics of models of a midwater trawl in flume tank of "Fishing Service".....	16
<b>Maksim O. Frank, Kirill D. Ovchinnikov, Vladimir A. Ryzhov</b> Prospects for the development of marine unmanned surface vehicles.....	22
<b>Sergei A. Ogai, Michael V. Voyloshnikov, Alexey S. Ogai</b> The methodic contradictions of the cost criteria and the profit-related ones when they are used at the initial stages of ship designing and the use of the criterion in the form of marine resources contribution index.....	29
<b>Victor A. Kulesh, Hiep Trung Pham</b> The stress-strain state analysis of the vessel's bottom with the external structural protection from ground.....	37
<b>THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS</b>	
<b>Kirill D. Ovchinnikov, Andrey A. Sinishin, Alena B. Belaya, Vladimir A. Ryzhov</b> Research of rudder system parameters influence to wave glider maneuverability.....	44
<b>Anastasia S. Gasnikova, Valentina V. Makarova, Yuri P. Potekhin</b> Computational study of hydrodynamic characteristics of the ship rudder located behind the deadwood.....	50
<b>Rudolf V. Borisov, Aleksandr A. Luzyanin</b> The safety of a ship swaying under the influence of irregular waves.....	58
<b>Viktoriya Yu. Semenova, Nikita A. Pavlyuchuk</b> Determination of the additional resistance that occurs during the ship's motions in various confined waterways.....	63
<b>Anatoliy S. Vas'kov, Aleksandr N. Shtanko, Anna V. Eskova</b> Analysis of the process of obsessing the turning of the vessel.....	71
<b>Alexander A. Rodionov, Evgeniya A. Karpenko, Vladimir A. Korshunov</b> Numerical simulation of the dynamic process of ship collision based on the coupled problem of the motion of one-dimensional models in a fluid.....	77
<b>SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION</b>	
<b>Ekaterina A. Vladetskaya, Sergey M. Bratan, Alexander O. Kharchenko, Evgeniy V. Hekert</b> Dynamics of vibration effects on a grinding machine in a floating workshop, taking into account sea waves.....	84
<b>Alexander V. Sannikov, Timofey Yu. Stoyanov, Anton K. Efremov</b> Experimental evaluation of the quality of expanded joints with different types of seals.....	94
<b>Anna V. Firsova, Alexey S. Bachev</b> Analysis of the technology of repairing the hull of a vessel made of polymer composite materials.....	102
<b>SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)</b>	
<b>Valeriy T. Matviienko, Andrey V. Dologlonyan, Alexandr G. Klimenko</b> Efficiency of the combined gas turbine plants at partial loads.....	109
<b>Vladimir A. Turkin, Alexander A. Styazhkin, Evgeny F. Zagurskiy</b> Safety management of ship power plants based on fuzzy logic.....	118
<b>Elena A. Nikushchenko</b> Calculation of Nusselt number for a steady turbulent non-isothermal fluid flow in a pipe with constant heat flux density on the wall using turbulent Prandtl number.....	124
<b>Andrey V. Passar, Dmitriy V. Timoshenko, Yuriy Ya. Fershalov</b> Optimal values of the angle of exit of the flow from the nozzle apparatus radial-axial turbine, depending on the mode of its operation.....	129
<b>Maxim I. Tarasov, Gennadiy P. Kicha, Andrey V. Nadezhkin</b> Computational and experimental modeling of the influence of lubricating oil waste on the state of a ship trunk diesel engine.....	136
<b>INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS</b>	
<b>Igor M. Dantsevich</b> Improvement of a small-sized remotely operated hybrid configuration unmanned submarine vehicle development.....	147
<b>Marina N. Lyutikova</b> Neural network controller for controlling a multipurpose towed complex with the formation of neurons in the asymptotic of Bernstein polynomials.....	153

**Oleg A. Bukin, Denis A. Korovetsky, Alexey A. Chekhlenok, Dmitriy Y. Proshchenko, Victoria F. Yurchik, Andrey M. Krivotulov, Elena A. Pyak.** Development of a new technology for monitoring and elimination of emergency oil spills on the sea surface using unmanned aerial vehicles (UAVs)..... 160

**Mikhail M. Shilin** Radio channel in remote control of uninhabitable underwater vehicles..... 170

**Dmitriy Yu. Proschenko, Oleg A. Bukin, Aleksey A. Chekhlenok, Ilya O. Bukin, Denis A. Korovetsky, Sergey S. Golik, Irina V. Sokolova, Andrey V. Nadezhkin** Development of hardware-software tools for monitoring oil pollution with the possibility of integration into remotely operated vehicles..... 175

**SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING**

**Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov** The principle of object recognition in a problem environment in the process of planning the behavior of an autonomous intelligent mobile system..... 181

**Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov,** Provisions and methods for the development of automatic monitoring of navigation safety..... 188

**Anatoliy S. Vas'kov, Aleksandr A. Mironenko** Smoothing methods comparison on the model's experimental data..... 198

**Boris A. Kasatkin, Nadezhda V. Zlobina, Sergey B. Kasatkin.** Detection and identification of a low-noise moving source against the background of noise from short-range shipping in shallow sea..... 205

**Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Elena Y. Kuznetsova** Assessment of environmental safety of water transportation of goods..... 212

**Olga Y. Lukomskaya, Yuri A. Lukomskij, Natalya V. Shatalova.** Development of the basic principles of modeling the processes of formation and maintenance of oncoming traffic flows in the cognitive transportation system of inland waterways..... 220

**Dmitriy A. Tatarenkov, Gleb G. Rogozinsky, Igor G. Malygin, Alexandra A. Kutlyiarova** Application of a neural network for the additional views synthesis in the challenge of constructing a virtual marine onboard simulator..... 228

**Vitaly A. Ushakov** Models and algorithms for controlling information processes in the moving objects interaction..... 235

**Petr P. Bobrik, Natalia V. Shatalova, Victor V. Visloguzov** Regulatory and Planning Arrangements in Chinese traffic to Western European ports..... 248

**Shakeeb S. Fahmi, Oleg A. Korolev, Olga V. Borodina.** A new algorithm for detecting and separating marine objects from the background in surveillance systems..... 256

**Natalia A. Polkovnikova, Anatoly K. Polkovnikov** Application of genetic algorithms for solving transport problems..... 265

**Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov** Planning the behavior of autonomous intelligent robots under conditions with a high level of a priori uncertainty..... 274

**Sergey N. Pavlikov, Ekaterina Y. Kopaeva., Yuriy Y. Kolesov, Pavel N. Petrov, Marina A. Gareeva** Mobile radio method..... 282

**AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS**

**Anatoliy S. Vas'kov, Aleksandr N. Shtanko** Adaptive model of vessel movement in control systems..... 288

**Kirill G. Tyulenev** Development of technological transport schemes for multimodal carriage applying water transport within the achievement of industrial strategic targets..... 296

**Aleksei G. Kotenko, Igor G. Malygin, Oleg A. Korolev.** Cognitive method of forming a model of a multimodal transportation process in universal transshipment complexes of large seaports..... 302

**MATHEMATICAL MODELLING, AND NUMERICAL PROCEDURES**

**Evgeny E. Abashkin, Anastasia V. Tkacheva** Study of Local Combined Heat Impact on Permanent Joints..... 310

**Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev** Numerical determination of non-linear forces of the second order arising from the interaction of certain types of ship's motion in shallow water conditions..... 319

**Valery K. Usoltsev, Kira V. Chupina** The controlled rampfunction generator for control systems..... 328

<b>Natalya V. Starzhinskaya, Anna I. Chernova</b> Logical-probabilistic modeling of reliability of a remote automated radio engineering post of a Vessel Traffic System.....	333
<b>Gennady B. Kryzhevich, Anton R. Filatov</b> Numerical modeling for forming of expanding joints of piles with the foundations of fixed offshore platforms and their operating capacity.....	340
<b>Yuri I. Nechaev, Dmitry V. Nikuschenko</b> Digital models of unsteady dynamics of underwater vehicle in the cloud computing environment.....	346

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.2.081

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.001>

### Экспериментальные исследования геометрических и силовых характеристик моделей разноглубинного трала в гидроканале «Фишеринг Сервис»

А.А. Недоступ<sup>1</sup> nedostup@klgtu.ru, А.О. Ражев<sup>1</sup> progacpp@live.ru, П.В. Насенков<sup>1</sup> pavel.nasenkov@klgtu.ru, Е.Е. Львова<sup>1</sup> ekaterina.lvova@klgtu.ru, В.В. Сысенко<sup>1</sup> vladimirsyenko@hotmail.com, Д.В. Аскарров<sup>1</sup> 6lupi@bk.ru

<sup>1</sup>Калининградский государственный технический университет

**Аннотация.** В статье приводятся исследования, направленные на практическое и экспериментальное подтверждение разработанной теории мультифизического подобия тралового комплекса в исследуемом диапазоне, на примере разработки проекта разноглубинного трала для лова ряпушки (*Coregonus albula*) в озере Виштынецкое. Для определения геометрических и гидродинамических характеристик траловых конструкций разработанного проекта трала были изготовлены его модели и проведены экспериментальные исследования по обоснованной методике в модернизированном гидроканале «Фишеринг-Сервис». По полученным экспериментальным данным, для моделей трала были рассчитаны значения гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $R_x$  и коэффициенты гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $c_x$  в зависимости от площади устья тралов  $F_y$  при заданном расстоянии между ножами, которые оказались равными, тем самым подтвердив истинность применяемой теории для исследуемого диапазона.

**Ключевые слова:** модель трала, эксперименты, гидроканал, гидродинамика, эксплуатация, исследования, характеристики, разработка.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность генеральному директору компании «Фишеринг-Сервис» Федорову А.Н. за предоставление экспериментальной площадки - гидроканала для проведения экспериментов моделей разноглубинного трала.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

**Для цитирования:** Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В., Львова Е.Е., Сысенко В.В., Аскарров Д.В. Экспериментальные исследования геометрических и силовых характеристик моделей разноглубинного трала в гидроканале «Фишеринг Сервис, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1. С. 16—21.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.001>

### Experimental studies of geometric and force characteristics of models of a midwater trawl in flume tank of “Fishing Service”

Alexander A. Nedostup<sup>1</sup> nedostup@klgtu.ru Alexey O. Razhev<sup>1</sup> progacpp@live.ru Pavel V. Nasenkov<sup>1</sup> pavel.nasenkov@klgtu.ru, Ekaterina E. Lvova<sup>1</sup> ekaterina.lvova@klgtu.ru,

Vladimir V. Sysenko<sup>1</sup> vladimirsyenko@hotmail.com, Dmitry V. Askarov<sup>1</sup> 6lupi@bk.ru

<sup>1</sup>Kaliningrad State Technical University

**Abstract.** The article presents research aimed at practical and experimental confirmation of the developed theory of the polyphysical similarity of the trawl complex, using the example of the development of a medium-depth trawl project for catching grouse (*Coregonus albula*) in the Vishtynets Lake. To determine the geometric and hydrodynamic characteristics of the trawl structures of the developed trawl project, its models were made and experimental studies were carried out using a reasonable methodology in the modernized Fishing-Service hydraulic channel. According to the experimental data obtained, the values of the hydrodynamic resistance of the rope-mesh part  $R_x$  and the coefficients of the hydrodynamic resistance of the rope-mesh part  $c_x$  were calculated for the trawl models, depending on the area of the mouth of the trawls  $F_y$  at a given distance between the knives that turned out to be equal, thereby proving the validity of the theory used.

**Key words:** trawl model, experiments, hydrochannel, hydrodynamics, operation, research, characteristics, development.

**Acknowledgments:** the authors express their gratitude to the General Director of the company "Fishing-Service" Fedorov A.N. for providing an experimental platform - a hydraulic channel for conducting experiments of models of a multi-depth trawl.

**Financial Support:** The study was carried out as part of the state assignment on the topic "Development of physical, mathematical and predictive models for the operation of bottom and mid-water trawl systems".

**For citation:** Alexander A. Nedostup, Alexey O. Razhev, Pavel V. Nasenkov, Ekaterina E. Lvova, Vladimir V. Sysenko, Dmitry V. Askarov, Experimental studies of geometric and force characteristics of models of a midwater trawl in flume tank of «Fishing Service», Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 16—21.

### Введение

Орудия промышленного рыболовства состоят из большого количества канатно-веревочных элементов, имеющих различные физико-механические характеристики, изменяемые при нагрузках и во времени, являясь формоизменяемыми инженерными конструкциями, что требует особого подхода на стадиях проектирования [1,2,3]. Особое внимание необходимо уделять расчету гидродинамических показателей с целью оптимального подбора орудия лова к тяге судна (агрегатное сопротивление орудия лова соответствует тяге судна) и как следствие это приведет к экономии топлива, контролю углеродного следа и повышению экологичности промысла.

Проектирование рыболовных судов сопряжено с оценкой агрегатного сопротивления траловой системы, которая определяется на физических моделях и с помощью математического аппарата.

Настоящие исследования направлены на практическое и экспериментальное подтверждение истинности разработанной теории мультифизического подобия тралового комплекса в исследуемом диапазоне, на примере разработки проекта разноглубинного трала для лова ряпушки (*Coregonus albula*) в озере Виштынецкое. Разработка трала является приоритетной задачей для Калининградской области, с точки зрения обоснования общего допустимого улова (ОДУ) для ее вылова, так как применение трала при добыче ряпушки окажет существенное приращение улова ценного вида гидробионтов.

### 1. Материалы и методы

Научная новизна работы авторов статьи заключается в обосновании методики проведения экспериментальных исследований для определения геометрических и гидродинамических характеристик траловых конструкций в модернизированном гидроканале ООО «Фишеринг-Сервис». Экспериментальные исследования с траловыми конструкциями в гидроканале «Фишеринг Сервис» (см. рис. 1) могут проводиться следующими методами:

- 1) система «модель трала - голые концы - кабели - лапки - траловые доски - ваера» (с помощью лазерных линеек измеряются: горизонт хода верхней подборы, горизонт хода досок, вертикальное и горизонтальное раскрытие устья трала, расстояние между траловыми досками, и с помощью датчика измеряются усилия в ваере, кабелях и голых концах);
- 2) система «модель трала - голые концы - кабели - лапки - раздвижные ножи» (см. рис. 2)» (с помощью лазерных линеек измеряются: вертикальное и горизонтальное раскрытие устья трала, и с помощью датчика измеряются усилия в кабелях и голых концах).



Рис. 1. Гидроканал ООО «Фишеринг-Сервис»

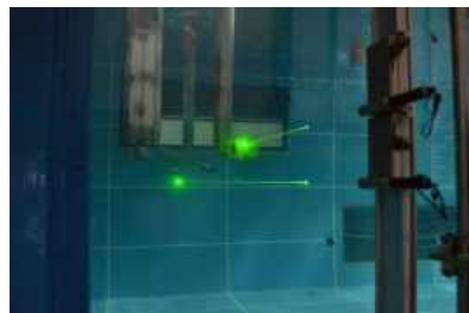


Рис. 2. Раздвижные ножи

Эти методики позволяют нам собирать данные с проведенных экспериментов, системы по своей природе похожи, но разносторонний подход к проведению экспериментов и дальнейшей обработке информации, позволяет нам получать более точные данные. Настоящие эксперименты с двумя моделями разноглубинного трала для лова ряпушки (*Coregonus albula*) в озере Виштынецкое проходили по второй методике (без ваеров и траловых досок) (см. рис. 3, 4). Модели тралов спроектированы с учетом теории подобия [4,5], а изготовлены из нитевидных и веревочных материалов, которые исследованы в экспериментах [6,7]. Конструктивные характеристики моделей тралов приведены в табл. 1.

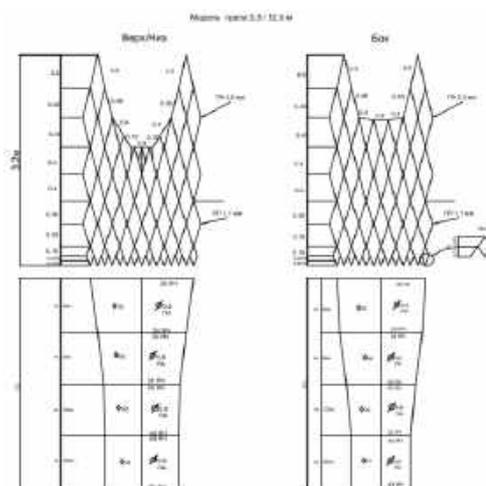


Рис. 3. Модель разноглубинного трала N-MWT-т1 3,3/12,0 м

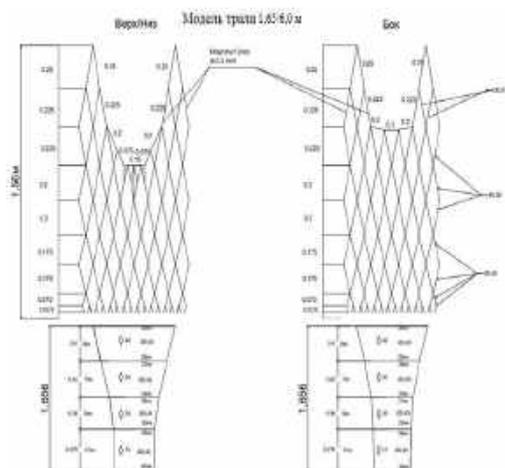


Рис. 4. Модель разноглубинного трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м

Таблица 1  
Конструктивные характеристики моделей трала

Модель трала	Сплошность, $F_0$	Площадь ниток и канатов, $F_{НК}$ , м <sup>2</sup>
N-MWT-m1 3,3/12,0 м	0,06	0,88
N-MWT-m2 1,65/6,0 м		0,225

## 2. Результаты экспериментов

В ходе проведения экспериментов были получены геометрические и силовые параметры моделей тралов, которые приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2  
Экспериментальные данные модели трала N-MWT-m1 3,3/12,0 м

Расстояние между траловыми досками (раздвижными ножами) $L_D$ , м	Скорость потока воды $v$ , м/с	Горизонтальное раскрытие устья трала по гужу, $L$ , м	Вертикальное раскрытие устья трала по гужу, $H$ , м	Натяжение в кабелях (верхнем/нижнем), $T$ , Н	Угол наклона кабелей в горизонтальной плоскости (верхнего/нижнего), $\alpha$ , град.	Угол наклона кабелей в вертикальной плоскости (верхнего/нижнего), $\beta$ , град.
1,5	1,0	0,97	1,52	-	82/82	4/21
	1,2	0,96	1,36	-	82/82	4/16
	1,55	0,94	1,25	-	81/82	3/12
	1,78	0,92	1,15	-	81/81	3/11
2,0	1,0	1,22	1,40	-	78/79	3/21
	1,2	1,27	1,25	-	79/79	2,5/19
	1,55	1,24	1,13	-	78/79	2,9/14
	1,78	1,19	1,06	-	78/78	3/13
2,5	1,0	1,53	1,25	19,0/12,6	75/76	3/21
	1,2	1,54	1,12	36,0/17,0	75/76	3,5/17
	1,55	1,51	1,01	61,0/23,7	75/76	4/14,3
	1,78	1,48	0,92	-	75/75	2/12

Таблица 3  
Экспериментальные данные модели трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м

Расстояние между траловыми досками (раздвижными и ножами) $L_D$ , м	Скорость потока воды $v$ , м/с	Горизонтальное раскрытие устья трала по гужу, $L$ , м	Вертикальное раскрытие устья трала по гужу, $H$ , м	Натяжение в кабелях (верхнем/нижнем), $T$ , Н	Угол наклона кабелей в горизонтальной плоскости (верхнего/нижнего), $\alpha$ , град.	Угол наклона кабелей в вертикальной плоскости (верхнего/нижнего), $\beta$ , град.
0,75	1,0	0,49	0,89	-	82/82	4/27
	1,19	0,48	0,78	-	82/82	0,5/25
	1,43	0,49	0,68	-	82/82	2/25
	1,78	0,47	0,61	-	81/82	0/20

1,0	1,0	0,625	0,84	-	78/79	14
	1,19	0,59	0,74	-	78/79	0/25
	1,43	0,63	0,62	-	78/79	2,5/23
	1,78	0,59	0,535	-	78/79	2/19
1,25	1,0	0,745	0,76	2,6/6,1	74/67	4/27
	1,19	0,52	0,66	7,0/6,3	67/68	2,5/25
	1,43	0,53	0,575	11/7,3	68/69	2/23
	1,78	0,68	0,48	-	73/73	1/20

Проведены экспериментальные исследования с моделями разноглубинного трала в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис» по методу крепления моделей: система «модель трала - голые концы - кабели - лапки - раздвижные ножи». На рис. 5 и 6 изображены экспериментальные данные модели N-MWT-m1 3,3/12,0 м.

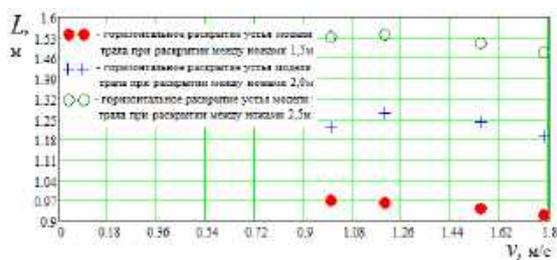


Рис. 5. Экспериментальные данные горизонтального раскрытия устья  $L$  модели трала N-MWT-m1 3,3/12,0 м и скорости потока воды  $v$

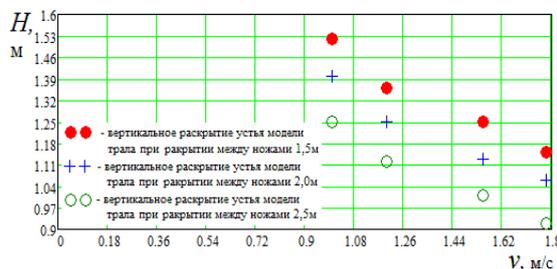


Рис. 6. Экспериментальные данные вертикального раскрытия устья  $H$  модели трала N-MWT-m1 3,3/12,0 м и скорости потока воды  $v$

На рис. 7 изображены экспериментальные данные площади устья  $F_y$  модели N-MWT-m1 3,3/12,0 м.

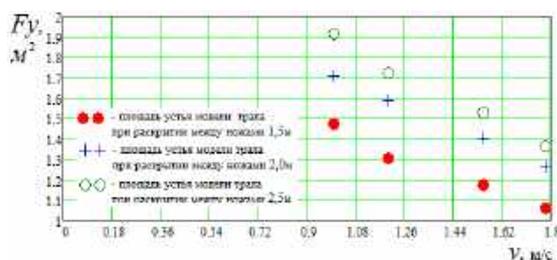


Рис. 7. Экспериментальные данные площади устья  $F_y$  модели трала N-MWT-m1 3,3/12,0 м и скорости потока воды  $V$

На рис. 8 изображены расчетные (по данным экспериментов) данные гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $R_x$  модели N-

MWT-m1 3,3/12,0 м при заданном расстоянии между ножами 2,5 м и N-MWT-m2 1,65/6,0 м при заданном расстоянии между ножами 1,25 м.

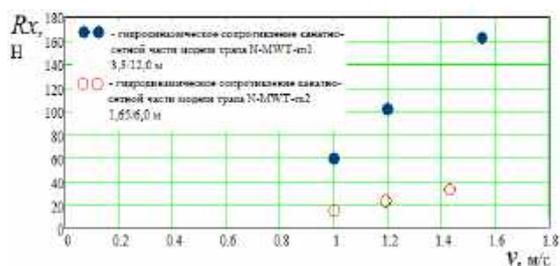


Рис. 8. Расчетные (по данным экспериментов) данные гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $R_x$  модели трала N-MWT-m1 3,3/12,0 м и скорости потока воды  $v$  при заданном расстоянии между ножами 2,5 м и N-MWT-m2 1,65/6,0 м при заданном расстоянии между ножами 1,25 м

На рис. 9 изображены расчетные (по данным экспериментов) данные коэффициента гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $c_x$  модели N-MWT-m1 3,3/12,0 м в зависимости от площади устья тралов  $F_y$  при заданном расстоянии между ножами 2,5 м и N-MWT-m2 1,65/6,0 м при заданном расстоянии между ножами 1,25 м.

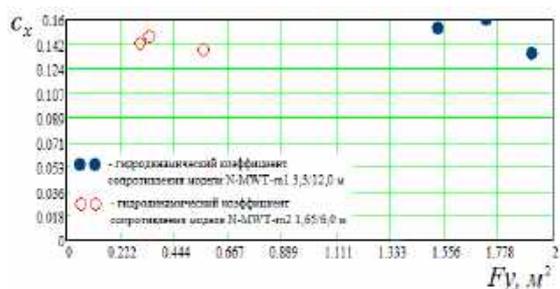


Рис. 9. Расчетные (по данным экспериментов) данные коэффициента гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $c_x$  модели трала N-MWT-m1 3,3/12,0 м и площади устья  $F_y$  при заданном расстоянии между ножами 2,5 м и N-MWT-m2 1,65/6,0 м при заданном расстоянии между ножами 1,25 м

Из рис. 9 видно, что значения коэффициентов гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $c_x$  модели N-MWT-m1 3,3/12,0 м при заданном расстоянии между ножами 2,5 м и N-MWT-m2 1,65/6,0 м при заданном расстоянии между ножами 1,25 м (при выполнении физического моделирования в масштабе геометрических характеристик  $C=0,5$ ) одинаковы (в пределах точности), т.е.  $C_{xN1}=C_{xN2}=idem$ .

На рис. 10 изображены расчетные (по данным экспериментов) данные коэффициента гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $c_x$  модели N-MWT-m1 3,3/12,0 м в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$  при заданном расстоянии между ножами 2,5 м и N-MWT-m2 1,65/6,0 м при заданном расстоянии между ножами 1,25 м.

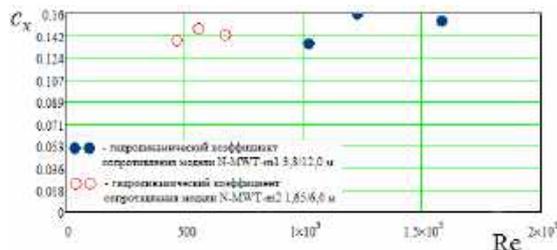


Рис. 10. Расчетные (по данным экспериментов) данные коэффициента гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $c_x$  модели трала N-MWT-m1 3,3/12,0 м в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$  при заданном расстоянии между ножами 2,5 м и N-MWT-m2 1,65/6,0 м при заданном расстоянии между ножами 1,25 м

### Заключение

Проектирование орудий рыболовства - это сложный трудоемкий процесс, так как орудия промышленного рыболовства имеют большие размеры и состоят из множества элементов, таких

как нитки, веревки, канаты, которые взаимосвязаны между собой. Проведение экспериментальных исследований с натурными орудиями лова не представляется возможным в связи с высокими финансовыми и трудовыми затратами [8].

В данной статье приведены исследования по разработке проекта разноглубинного трала с применением теории мультифизического подобия [4,5]. Для подтверждения истинности примененной теории в исследуемом диапазоне были изготовлены модели трала и проведены экспериментальные исследования по обоснованной методике в модернизированном гидроканале «Фишеринг-Сервис».

По полученным экспериментальным данным были определены значения гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $R_x$  и коэффициенты гидродинамического сопротивления канатно-сетной части  $c_x$  для разработанных моделей трала, которые показали сходжение, тем самым подтвердив истинность применяемой теории для исследуемого диапазона.

По данным экспериментальных исследований, приведенных в настоящей статье, при выполнении критериев подобия теории подобия [4,5] будет спроектирован натуральный разноглубинный трал для лова ряпушки (*Coregonus albula*) в озере Виштынецкое.

### Литература

1. Fiorentini L., Sala A., Hansen K., Cosimi G., Palumbo V. Comparison between model testing and full-scale trials of new trawl design for Italian bottom fisheries// Fisheries Science. - 2004. - № 70 - p. 349 - 359.
2. Lee C.-W., Lee Ju.-H., Cha B.-J., Kim H.-Y., Lee Ji.-H. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation// Ocean engineering. – 2005a. - №32. - p. 331–347.
3. Matsushita Y., Kumazawa T., Tomiyama M., Fujita K., Yamasaki S. Designs and configurations of small-scale otter trawl fishing gear used in Ise-wan Bay, Aichi, Japan // Nippon suisan gakkaiishi. - 2005. - № 71(3) - p. 318 - 327.
4. Недоступ А.А. Физическое моделирование орудий и процессов рыболовства: Монография. Калининград: Издательство ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2012. - 375 с.
5. Недоступ А.А., Ражев А.О. Создание правил мультифизического подобия тралового комплекса. Морские интеллектуальные технологии. №1 - Том 1 - 2021. - С. 132-137.
6. Насенков П.В., Недоступ А.А., Наумов В.А. Экспериментальные исследования разрывного усилия и относительного удлинения рыболовных веревочно-нитевидных изделий с различной скоростью разрыва и длиной исследуемых образцов. Известия КГТУ. №58. - 2020. - С. 35-48.
7. Недоступ А.А., Коновалова К.В., Насенков П.В., Ражев А.О., Альтшуль Б.А., Федоров С.В. Относительная жесткость рыболовных крученых изделий // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. Астрахань. АГТУ. №1. 2020. - С. 46-60.
8. Nowakowski P., Sendlak H., Berest K. Studies on resistance coefficient of various pelagic trawl net types based on the results of their models tests// Methods for the development and evaluation of maritime technologies DEMAT 2005. - 2006. Rostock. - p. 231 - 241.

### References

1. Fiorentini L., Sala A., Hansen K., Cosimi G., Palumbo V. Comparison between model testing and full-scale trials of new trawl design for Italian bottom fisheries// Fisheries Science. - 2004. - № 70 - p. 349 - 359.
2. Lee C.-W., Lee Ju.-H., Cha B.-J., Kim H.-Y., Lee Ji.-H. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation// Ocean engineering. – 2005a. - №32. - p. 331–347.
3. Matsushita Y., Kumazawa T., Tomiyama M., Fujita K., Yamasaki S. Designs and configurations of small-scale otter trawl fishing gear used in Ise-wan Bay, Aichi, Japan // Nippon suisan gakkaiishi. - 2005. - № 71(3) - p. 318 - 327.
4. Nedostup A.A. Fizicheskoe modelirovanie orudij i processov rybolovstva: Monografiya. [Physical Modeling of Fishing Tools and Processes: Monograph]. Kaliningrad: Izdatel'stvo FGBOU VPO «KGTU», 2012, 375 p.
5. Nedostup A.A., Razhev A.O. Sozdanie pravil mul'tifizicheskogo podobiya tralovogo kompleksa. [Creation of rules for multiphysics similarity of the trawl complex.]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. №1, Tom 1, 2021, pp. 132-137
6. Nasenkov P.V., Nedostup A.A., Naumov V.A. Eksperimental'nye issledovaniya razryvnogo usiliya i otnositel'nogo udlineniya rybolovnyh verevochno-nitevidnyh izdelij s razlichnoj skorost'yu razryva i dlinoj issleduemyh obrazcov.

- [Experimental studies of breaking force and relative elongation of fishing rope-thread-like products with different breaking speed and length of the samples under study]. Izvestiya KGTU, №58, 2020., pp. 35-48
7. Nedostup A.A., Konovalova K.V., Nasenkov P.V., Razhev A.O., Al'tshul' B.A., Fedorov S.V. Otnositel'naya zhestkost' rybolovnykh kruchenykh izdelij [Relative stiffness of fishing twisted products] //Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyajstvo. Astrahan'. AGTU, №1, 2020, pp. 46-60
  8. Nowakowski P., Sendlak H., Berest K. Studies on resistance coefficient of various pelagic trawl net types based on the results of their models tests// Methods for the development and evaluation of maritime technologies DEMAT 2005. - 2006. Rostock. - p. 231 - 241.

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

**Александр Алексеевич Недоступ**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

**Alexander A. Nedostup** Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

**Алексей Олегович Ражев**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: progacpp@live.ru

**Aleksey O. Razhev**, Ph.D. (Eng), Junior Researcher, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: progacpp@live.ru

**Павел Владимирович Насенков**, соискатель кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

**Pavel V. Nasenkov**, Research scholar of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

**Екатерина Евгеньевна Львова**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: ekaterina.lvova@klgtu.ru

**Ekaterina E. Lvova**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: ekaterina.lvova@klgtu.ru

**Владимир Владимирович Сысенко**, магистрант кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: vladimirsyenko@hotmail.com

**Vladimir V. Sysenko**, master's student of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy Prospect, 1, e-mail: vladimirsyenko@hotmail.com

**Дмитрий Всеволодович Аскарков**, магистрант кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: 6lupi@bk.ru

**Dmitry V. Askarov**, master's student of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy Prospect, 1, e-mail: 6lupi@bk.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.06.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.07.2022.

Научная статья

УДК 629.5.07

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.002>

## Обзор российского и зарубежного опыта создания безэкипажных катеров

М.О. Франк<sup>1</sup> frankmaks95@mail.ru, К.Д. Овчинников<sup>1</sup> ovchinnikov\_kd@mail.ru, В.А. Рыжов<sup>1</sup> varyzhov@smtu.ru  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В работе проведен ретроспективный анализ безэкипажных катеров, приведена информация о современном состоянии флота безэкипажных катеров, их назначении, а также перспективах использования в гражданском секторе. На ранних рубежах своего развития безэкипажные решения применялись в тех случаях, когда требовалось удаление личного состава от непосредственного контакта с противником (опасной средой). В большей степени эта цель преследуется и сегодня. Однако сейчас стало ясно, что их преимущества на этом не ограничиваются. Наиболее перспективными направлениями развития безэкипажных катеров и групп катеров являются: пожарные катера, катера-бонопостановщики, катера в составе пограничных кораблей и безэкипажные баржи. Несмотря на интенсивное развитие безэкипажных катеров, полностью отказаться от участия человека при эксплуатации данного вида техники невозможно. Для ее нормального функционирования требуются специальные суда-носители, способные в полной мере обеспечивать хранение, транспортировку, спуск/подъем, обслуживание и так далее. Проектирование безэкипажных катеров совместно с судном-носителем является важной и актуальной задачей, которая на настоящий момент не решена.

**Ключевые слова:** безэкипажный катер, безэкипажная морская система, радиоуправление, телеуправление.

**Для цитирования:** Франк М.О., Овчинников К.Д., Рыжов В.А. Обзор российского и зарубежного опыта создания безэкипажных катеров, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 22—28

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.002>

## Review of Russian and foreign experience of marine unmanned surface vehicles development

Maksim O. Frank<sup>1</sup> frankmaks95@mail.ru, Kirill D. Ovchinnikov<sup>1</sup> ovchinnikov\_kd@mail.ru,  
Vladimir A. Ryzhov<sup>1</sup> varyzhov@smtu.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** The paper consists a retrospective analysis of marine unmanned surface vehicles, provides information about current conditions of the USV fleet, their purposes, as well as the prospects for use in the civilian sector. At the early stages of its development, unmanned solutions used in cases where it required removing personnel from direct contact with the enemy or dangerous environment. This purpose is available today. However, it has now become clear that their advantages are not limited to this. The most promising areas for the development of marine unmanned surface vehicles are: fire boats, boom-laying boats, boats in border ships and unmanned barges. Despite the intensive development of USV, it is impossible to completely abandon human participation in its operation. For its normal operation, special carrier vessels require, capable of fully providing storage, transportation, launching / lifting, maintenance, and so on. The design of USV together with the carrier vessel is an important task that has not resolved.

**Keywords:** marine unmanned surface vehicle, USV, radio control, remote control.

**For citation:** Maksim O. Frank, Kirill D. Ovchinnikov, Vladimir A. Ryzhov Review of Russian and foreign experience of marine unmanned surface vehicles development, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 22—28

### Введение

На сегодняшний день идет активная разработка, внедрение и применение безэкипажных катеров в морской деятельности.

Первоначально безэкипажные катера нашли применение в военной сфере, однако их использование возможно для широкого круга научно-исследовательских и прикладных задач. Сейчас наиболее перспективными являются задачи, связанные с освоением и мониторингом Мирового океана, в том числе с поддержкой решения экологических задач, задач прогнозирования климата и контроля биоресурсной базы, разработкой подводных месторождений полезных ископаемых, сейсморазведкой, использованием в качестве средств контроля и оповещения в чрезвычайных ситуациях [1, 2].

В настоящей работе проведен ретроспективный анализ безэкипажных катеров, приведена информация о современном состоянии флота безэкипажных катеров, их назначении, а также перспективах использования в гражданском секторе.

### История развития безэкипажных катеров

История освоения технологий дистанционно управляемых морских средств начинается с демонстрации Никола Теслой в 1898 г. дистанционно управляемой модели судна [3]. В ноябре того же года результаты его работ были отражены в полученном им патенте № 613809 «Способ и устройство для управления машинным механизмом движущихся судов или сухопутных средств передвижения» [4].

Первой страной, где данная идея получила практическое применение, является Германия. 2 марта 1917 г. радиоуправляемое судно, начиненное

взрывчаткой, на полном ходу выбросилось на набережную гавани г. Ньюпорта, совершив ее подрыв на участке 12 м [5]. В период с 1915-1918 гг., в состав флота Германии были введены 17 телеуправляемых взрывающихся катеров, разработанных немецким инженером Эрнстом Вернер фон Сименсом, часть из которых управлялась посредством электрокабеля, длина которого достигала 32 км, а часть – по радиоканалу [6].

История отечественной морской безэкипажной техники берет свое начало в 1920 г. Тогда, известный советский инженер В.И. Бекаури предложил создать так называемые «катера волнового управления» (КВУ). Идею поддержали на самом высоком уровне и уже в 1921 г. под его руководством было создано «Особое техническое бюро по военным изобретениям специального назначения (Остехбюро)». 20 октября 1924 г. были проведены испытания катера «Торпеда», управление которым осуществлялось с помощью радиостанции, установленной на опытном судне «Микула», на расстоянии 26 км [5, 6].

Параллельно Бекаури разработкой устройств радиоуправления занимался инженер А.Ф. Шорин, который в 1927 г. продемонстрировал изобретение, позволявшее управлять по радио небольшим катером «Оса». По командам оператора катер выполнял сложные маневры, запускался и выключался двигатель, велась стрельба из пулемета. В связи с этим, в дополнение Остехбюро в 1928 г. была создана «Центральная лаборатория проводной связи» (ЦЛПС) под руководством Шорина [5].

В середине лета 1931 г. обе организации предъявили на государственных испытаниях опытные образцы торпедных катеров, оборудованные радиотелемеханическими системами. По результатам испытаний системы ЦЛПС были рекомендованы к принятию на вооружение [5, 6].

В августе 1932 г. на совместных испытаниях радиотелемеханических систем ЦЛПС и Остехбюро осуществляющих управление с борта самолета двумя торпедными катерами с системами «Кварц» и «Вольт-Р». В результате испытаний обе системы были рекомендованы к принятию на вооружение. Уже в 1935 г. на всех флотах ВМФ соединения торпедных катеров пополнились радиоуправляемыми катерами Г-5 и Ш-IV (Рис. 1) [5, 7]. Наиболее полно опыт эксплуатации указанных катеров, а также плюсы и недостатки систем управления, приведены в работах [5, 6, 7].



Рис. 1. Торпедные радиоуправляемые катера на Кронштадтском рейде (1939 г.) [5]

Несмотря на успешные испытания советских КВУ, попытки их боевого применения в Великую Отечественную войну по ряду причин закончились безрезультатно. Более успешно данную технику в то время использовали немцы, поскольку имели

принципиально отличную модель их применения: дистанционно управляемые катера пилотировались человеком, который на определенной дистанции от вражеских кораблей, по сигналу с катера управления, переводил их в дистанционный режим и выбрасывался за борт [6].

Первые попытки использования КВУ в качестве мишеней отечественные инженеры осуществили в послевоенное время. Так, в период с 1949 по 1956 г. инженерами специализированного конструкторского бюро СКБ-19, ныне ЦМКБ «Алмаз», были разработаны проекты 383-катер-цель (Рис. 2) и 384-катер-управления. Катера были предназначены для проведения боевой подготовки бомбардировочной авиации ВВС. Проведенные испытания на Ладожском озере и Балтийском море показали их практическую значимость, что послужило их серийной постройке. Исчерпывающая информация о техническом оснащении указанных катеров представлена в [7]. В дальнейшем, необходимость испытания новых видов ракетного вооружения требовало разработки более современных катеров-целей, позволяющих давать реальную оценку его эффективности. Так появились катера-цели проектов 123Ц, 183Ц и др.



Рис. 2. Радиоуправляемый катер-цель пр. 383 [5]

Появление оружия массового поражения поставило перед инженерами задачу по определению его поражающих факторов и возможности пребывания личного состава в районах применения этого оружия. Решение видели в создании радиоуправляемых катеров, оснащенных специальными средствами радиационной и химической разведки. В начале 1950-х гг. уже хорошо зарекомендовавший себя отечественный КВУ проекта 383 был переоборудован для выполнения этих задач (зав. №3322) [7].

Опыт применения КВУ доказал свое преимущество над традиционными обитаемыми судами в случаях решения задач, исключаящих возможность пребывания личного состава или же подвергающих его большой опасности. Таким образом, КВУ получили новое развитие в виде катеров тральщиков-шнурокдадчиков, обеспечивающих проходы в минных заграждениях путем их подрыва шнуровыми зарядами. В 1966 г. разработанный ЦКБ-19 радиоуправляемый катер пр. 1253 пополнил ряды минно-трального флота СССР [9]. В тот же период, ВМС США на семиметровые лодки устанавливали аппаратуру дистанционного управления для траления мин [8].

Бурный рост внедрения в технику информационных технологий, приходящий на 1970-1980 гг., значительно повлиял на развитие безэкипажных систем. В конце 1970-х годов ряд европейских военно-морских сил приступили к разработке нового поколения противоминных систем. Первой такой системой является немецкая

«Тройка», разработанной компанией STN Atlas Elektronik и поступившая на вооружение в 1980 г. Концепция системы заключалась в дистанционном управлении с корабля-управления тремя радиоуправляемыми прорывателями минных заграждений, оснащенные буксирными акустическими и магнитными тралами [8, 9]. Немного позже на катерах были установлены приемники GPS, обновилась система управления. Это позволило сократить число операторов с 4-ех до 2-ух человек [10]. В 1991 г. комплекс показал высокую эффективность при разминировании в Персидском заливе [8]. Всего было построено шесть систем данного типа. Подобные системы по сей день имеются на вооружении ВМС Германии, Великобритании, США, КНР и другие [9].

С 1982 г. такие работы велись и в СССР. Так, в 1990 г. ВМФ пополнился противоминным комплексом в составе прорывателей минных заграждений и его катера-управления (Рис. 3), разработанных Западным проектно-конструкторским бюро (с 1998 г. в составе ЦМКБ «Алмаз») [11].



Рис. 3. Речной рейдовый радиоуправляемый прорыватель минных заграждений пр. 13000 (сверху) и его катер-водитель пр. 12255 (снизу)

Так, за XX в. безэкипажные надводные морские системы эволюционировали с достаточно примитивных с точки зрения управления катеров-взрывателей до высокоинтеллектуальных комплексов противоминной обороны.

Период конца XX и начала XXI вв. ознаменован следующим, современным этапом развития безэкипажных надводных систем. За последние 30 лет спектр выполняемых ими задач значительно расширился, найдя свое применение и в гражданском секторе, наилучшим образом интегрировав в безэкипажные катера (БЭК) новейшие технические разработки, которые являются одновременно надежными и эффективными. Следует отметить, что надежность системы управления является одним из ключевых факторов эффективного использования БЭК. Именно это повлияло на решение государственной комиссии СССР, после проведения испытаний радиоуправляемых торпедных катеров в 1932 г., отказаться от работ Остехбюро по совершенствованию радиотелемеханической системы с использованием счетно-решающего устройства. В то время низкая надежность «умной»

системы управления обусловлена низкими темпами развития информационных систем, кибернетики и др., впоследствии позволивших разработать сложные алгоритмы управления противоминных систем (противоминный комплекс в составе прорывателей минных заграждений и его катера-управления, 1990 г.).

С конца 1990-х годов за рубежом был проведен ряд значительных научно-исследовательских и опытно-конструкторских программ по передовым направлениям БЭК [5, 6]. Программы SAIC / Navtec Owl и OwlII в США исследовали роль малых БЭК (длиной 3 м) в операциях наблюдения и защиты гавани. Эти программы позволили оценить многие технические проблемы и потенциальные решения в ключевых технических областях БЭК, включая командование и управление на дальней дистанции, а также запуски и обнаружение на театре военных действий. Программа Us Spartan USV была сосредоточена на адаптации стандартных 7-метровых и 11-метровых жестко-корпусных надувных лодок для производства жизнеспособных полуавтономных многоцелевых БЭК. Важным аспектом программы Spartan является разработка модульных полезных нагрузок миссии, которые могут быть легко и быстро интегрированы на основные платформы Spartan для удовлетворения требований к ролям, которые включают антитеррористическую защиту, силовую защиту, мелководную противолодочную войну, мелководное противоминное противодействие, дискретное наблюдение и наземное нападение.

По состоянию на 2020 г. многие развитые страны, такие как Россия, США, Канада, Япония, Китай, Израиль, страны Европейского союза и др. активно развивают направление безэкипажных систем. Так, например, в оборонном бюджете ВМС США на 2020 г. значительную статью расходов (~450 млн. долларов) занимает закупка двух больших беспилотных кораблей.

### Современное состояние и классификация БЭК

На ранних рубежах своего развития БЭК применялись в тех случаях, когда требовалось удаление личного состава от непосредственного контакта с противником (опасной средой). В большей степени эта цель преследуется и сегодня. Однако после более векового использования и развития безэкипажных морских систем стало ясно, что их преимущества на этом не ограничиваются.

Благодаря интенсивному развитию информационных технологий функциональные назначения БЭК расширились:

- Испытания новых видов вооружения;
- Противоминная оборона;
- Противолодочная оборона;
- Разведка, обследование и наблюдение;
- Патрулирование и охрана;
- Борьба с малоразмерными надводными целями;
- Ретрансляция и обслуживание подводных аппаратов;
- Исследовательские задачи;
- Подъем и транспортировка людей на море.

Нужно отметить, что уже сегодня некоторые принятые в эксплуатацию БЭК обладают несколькими из приведенных назначений, что

позволяет их классифицировать как многофункциональные.

Как и ранее, большинство реализованных образцов БЭК используются в военном секторе. Но в отличие от предшественников, оснащение и архитектура современных БЭК претерпели значительные изменения. Современные средства, обеспечивающие дистанционное управление БЭК, не требуют больших объемов помещений для их размещения. Таким образом, подавляющее большинство существующих БЭК представляют собой небольшие однокорпусные катера (длиной до 10 м) и чаще всего имеют облик, представленный на рис. 4.



Рис. 4. Типовой облик современного БЭК

Рубка современных БЭК представляет собой помещение, оснащенное устройствами для сбора и хранения информации, навигационными приборами и средствами управления, позволяющие управлять БЭК, когда это необходимо, человеком. Одновременно рубка защищает все электронное оборудование от внешней среды.

На грузовой палубе в корме и на палубе в носу может размещаться «полезная нагрузка», начиная от спускоподъемных устройств, заканчивая артиллерийским орудием и/или иными средствами вооружения.

Навигационное оборудование чаще всего размещается на крыше рулевой рубки. Помимо навигационных устройств там же размещаются средства визуального контроля – камеры.

Удачным решением является использование в качестве несущей платформы (корпуса) БЭК лодок RIB с жестким днищем и надувными бортами (Рис. 5). Также в качестве платформы БЭК активно используются катамараны.



Рис. 5. БЭК специального назначения ВМС США на базе жестко-корпусной надувной лодки

Ввиду постоянного технического развития и освоение новых сценариев использования БЭК, их общепринятая классификация еще не сформулирована. В работе [12] представлена классификация БЭК, сформулированная в рамках программы развития безэкипажных морских систем (PMS 406) ВМС США. Согласно ей БЭК разделены на 4 класса в зависимости от длины (по вертикали): очень малые (длиной менее 7 м), малые (от 7 до 12

м), средние (от 12 до 50 м) и крупные (более 50 м). Также для каждой группы представлены развитие функциональных возможностей БЭК: текущие (на сегодняшний день), ближайшее развитие и дальнейшие перспективы. В плане по развитию БЭК присутствуют направления обеспечения морской безопасности (морская логистика), выполнения «специальных» задач, а также поддержки перехвата надводных целей [13]. Несмотря на отсутствие в приведенной классификации, задач по испытанию вооружения посредством кораблей-целей, данное направление актуальность не утратило.

До недавнего времени использование БЭК в гражданском секторе ограничивалось обследованием портов и гаваней. Полученный опыт позволил произвести так называемую «обкатку» информационных средств управления исследовательских БЭК и продемонстрировал их преимущества и недостатки. Среди преимуществ можно выделить высокую мобильность доставки БЭК в исследовательский район, заметное снижение эксплуатационных расходов (по сравнению с судами подобного назначения). К недостаткам можно отнести низкую мореходность, низкую автономность, ограниченную дальность плавания, малую энергооборуженность, а также ограниченные функциональные возможности измерительного оборудования, устанавливаемого на БЭК (по сравнению с судами подобного назначения) [14].

Несмотря на интенсивное развитие БЭК, полностью отказаться от участия человека при эксплуатации данного вида техники невозможно. Как сказано ранее, малые автономность, дальность плавания и мореходность значительно ограничивают использование безэкипажной морской техники. Таким образом, для ее нормального функционирования требуются специальные суданосители, способные в полной мере обеспечивать хранение, транспортировку, спуск/подъем, обслуживание и др. Однако в настоящее время данному типу судов должного внимания уделено не было.

В свою очередь решение задачи определения наиболее эффективной конфигурации системы судно-носитель – аппараты (катера) является важной проблемой. Оно требует разработки специальных расчетных моделей и алгоритмов, позволяющих осуществлять поиск наиболее оптимальной конфигурации судна, в том числе для каждого конкретного случая с учетом особенностей эксплуатации как судно-носителя, так и безэкипажной техники.

#### Перспективные направления развития

По мнению авторов, существует ряд перспективных направлений развития БЭК, которые позволят повысить уровень решения некоторых задач:

1. Пожарные БЭК. Как отмечено ранее, отсутствие на борту БЭК личного состава исключает риск его поражения от воздействия поражающих факторов. В данном случае под поражающими факторами можно считать высокие температуры, вероятность взрыва, углекислый и другие токсичные газы, образующиеся в результате процесса горения. Все это позволяет БЭК подходить как можно ближе к очагу возгорания и точно воздействовать на него

огнетушащими средствами. Эффективность тушения пожара силами нескольких пожарных БЭК увеличивается.

2. БЭК-бонопостановщики. Сложность постановки бонов для локализации аварийного разлива нефтепродуктов сложно переоценить. Существующий риск возгорания нефти при выполнении таких операций вносит дополнительную сложность. БЭК-бонопостановщики позволяют упростить процесс постановки бонов, снизив при этом все существующие риски. Визуальный контроль операторов БЭК позволит более гибко реагировать на любые изменения. В данном случае целесообразно иметь не менее двух БЭК. Размещение на их борту лафетных стволов позволит предотвратить дальнейшее возгорание нефтяного пятна, при локальном его возгорании в момент выполнения операции по постановке бонов.

3. БЭК в составе пограничных сторожевых кораблей. Опытные образцы БЭК с установленной артиллерийской установкой уже нашли свою практическую реализацию. Наличие в составе сторожевого корабля пограничной зоны несколько БЭК позволит вести лучший визуальный контроль над пограничной зоной, а размещаемые на борту БЭК артиллерийские установки позволят производить силовое воздействие на нарушителей.

4. Безэкипажные баржи или безэкипажные грузовые суда внутреннего плавания [15, 16, 17, 18]. Согласно проведенным исследованиям сейчас доминирующую роль во внутреннем грузообороте стран Европы имеет автомобильный транспорт [16, 17]. Использование безэкипажных судов для доставки грузов по внутренним водным путям потенциально может сделать внутренние водные пути экономически более выгодными. Такое развитие может дать хороший толчок в развитии морских и океанских безэкипажных судов, возможность постройки которых довольно давно активно обсуждают [19]. Данный тип судов сложно отнести к катерам, однако реализуемые на данный момент проекты, в основном, имеют небольшие размеры.

### Заключение

В настоящей работе приведена информация о морских безэкипажных системах, БЭК в частности,

областях их применения и перспективные направления их развития.

Проведенный исторический анализ позволил выявить основные этапы развития функциональных назначений и областей применения БЭК. До конца XX в. БЭК, в значительной степени, использовались для решения военных задач. Активное освоение гражданского сектора приходится на начало XXI в.

Полученный за это время опыт эксплуатации БЭК позволил выделить их основные недостатки и преимущества. Среди преимуществ можно выделить: малые размеры, позволяющие размещать их на палубе любого судна, расширяя тем самым спектр решаемых им задач, высокую мобильность доставки БЭК в заданный район, заметное снижение эксплуатационных расходов (по сравнению с судами подобного назначения). Можно полагать, что строительство БЭК как платформы подвержено серийности, что также сказывается на уменьшении итоговой стоимости. К недостаткам можно отнести: низкие мореходность и автономность, ограниченную дальность плавания, малую энерговооруженность, а также ограниченные функциональные возможности измерительного оборудования, устанавливаемого на БЭК (по сравнению с судами подобного назначения).

Вопросы об обеспечении нормальной эксплуатации БЭК в открытом море не решены. Прежде всего, это связано с низкой энерговооруженностью и мореходностью. Таким образом, их нормальное функционирование невозможно без специальных судов-носителей, способных в полной мере обеспечивать их хранение, транспортировку, спуск/подъем, обслуживание и др. Известно, что использование подводной и надводной безэкипажной техники совместно, а иногда надводной и воздушной, может повысить эффективность решения некоторых задач. В свою очередь решение задачи определения наиболее эффективной конфигурации системы судно-носитель – аппараты (катера) является важной проблемой. Она требует разработки специальных расчетных моделей и алгоритмов, позволяющих осуществлять поиск наиболее оптимальной конфигурации судна, в том числе для каждого конкретного случая с учетом особенностей эксплуатации как судно-носителя, так и безэкипажной техники.

### Литература

1. И.В. Кожемякин, К. В. Рождественский, В. А. Рыжов, А. В. Смольников. Разработка автономных необитаемых подводных глайдеров. Известия ЮФУ. 2013 №3, Тематический выпуск, Перспективные системы и задачи управления.
2. Guidance for developing Maritime Unmanned Systems (MUS) capability, Combined Joint Operations from the Sea Centre of Excellence, 9 July 2012.
3. Miomir Vukobratović. Nikola Tesla and Robotics. SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING Vol. 3, №2, November 2006, 163–175 p.
4. Nicola Tesla. Method of and apparatus for controlling mechanism of moving vessels or vehicles // Patent USA №613809, 1 July 1898.
5. О. Тарасов, Е. Шошков. Судьба катеров волнового управления. Морской сборник №2 от 1990 г. Журнал Военно-Морского Флота СССР.
6. А. Б. Широкоград. Чудо-оружие СССР – Тайны советского оружия. Изд. «Вече». Москва - 2005 г.
7. Е. Юхнин. Радиоуправляемые корабли и катера ВМФ. Морской сборник №4 от 1999 г. Журнал Военно-Морского Флота СССР.
8. И.Г. Захаров, А.В. Шляхтенко. Корветы: концептуальное проектирование. – Санкт-Петербург: ООО «Береста», 2012 г.
9. Ю.В. Апальков. Корабли ВМФ СССР. Справочник том IV. Десантные и минно-тральные корабли. – Санкт-Петербург: «Галера Принт», 2007 г.
10. В. Щербаков. Война на море – эпоха машин. Журнал «Вокруг света» №7, 2008 г.

11. В. Мосалев. Необитаемые надводные аппараты в ВМС иностранных государств. Зарубежное военное обозрение, №10, 2006 г. стр. 60-67
12. Presentation of briefing by Captain Pete Small, Program Manager, Unmanned Maritime Systems (PMS 406), entitled "Unmanned Maritime Systems Update," January 15, 2019.
13. THE NAVY UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) MASTER PLAN, 23 July 2007.
14. Unmanned Marine Systems - ASVs, USVs & Autonomous Boat Control, January 15, 2019.
15. G Peeters et al Design and build of a scale model unmanned inland cargo vessel: actuation and control architecture. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1357 (2019) 012016.
16. G Peeters et al An unmanned inland cargo vessel: Design, build, and experiments. Ocean Engineering 201 (2020) 107056.
17. G Peeters et al An Inland Shore Control Centre for Monitoring or Controlling Unmanned Inland Cargo Vessels. J. Mar. Sci. Eng. 2020, 8, 758; doi:10.3390/jmse8100758.
18. a-Навигация или Как развиваются в России автономные суда? URL: [https://www.korabel.ru/news/comments/a-navigaciya\\_ili\\_kak\\_razvivayutsya\\_v\\_rossii\\_avtonomnye\\_suda.html](https://www.korabel.ru/news/comments/a-navigaciya_ili_kak_razvivayutsya_v_rossii_avtonomnye_suda.html) (дата использования интернет-ресурса 30.06.2022).
19. Maritime autonomous surface ships on the horizon. URL: <https://www.gard.no/web/updates/content/27107214/mari-time-autonomous-surface-ships-on-the-horizon> (дата использования интернет-ресурса 30.06.2022)

### References

1. I.V. Kozhemyakin, K.V. Rozhdestvensky, V.A. Ryzhov, A.V. Smolnikov DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER GLIDERS. IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES. 2013 №3 (in Russian).
2. Guidance for developing Maritime Unmanned Systems (MUS) capability, Combined Joint Operations from the Sea Centre of Excellence, 9 July 2012.
3. Miomir Vukobratović. Nikola Tesla and Robotics. SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING Vol. 3, №2, November 2006, 163–175 p.
4. Nicola Tesla. Method of and apparatus for controlling mechanism of moving vessels or vehicles // Patent USA №613809, 1 July 1898.
5. О. Тарасов, Е. Шошков Суд'ба катеров волнового управления [The fate of wave control boats]. Morskoy sbornik №2 of 1990. The magazine of USSR Navy (in Russian).
6. А.В. Ширококорд Чудо-оружие СССР – Тайны советского оружия [Wonderful weapons of the USSR - Secrets of Soviet weapons.]. Izd. «Veche». Moscow, 2005 (in Russian).
7. Е. Укхнин Е. Юхнин. Радиуправляемые корабли и катера ВМФ [Radio-controlled ships and boats of the Navy]. Morskoy sbornik №4 of 1999. The magazine of USSR Navy (in Russian).
8. I.G. Zakharov, A.V. Shlyakhtenko Korvety: konceptual'noe proektirovanie [Corvettes: conceptual design]. – St. Petersburg, «Beresta», 2012 (in Russian).
9. U.V. Apalkov Korabli VMF SSSR. Spravochnik tom IV. Desantnye i minno-tral'nye korabli [Ships of the USSR Navy. Handbook volume IV. Landing and mine-sweeping ships]. – St. Petersburg, «Galey Print», 2007 (in Russian).
10. V. Scherbakov Vojna na more – jepoha mashin [War at sea in the age of machines]. Zhurnal «Vokrug sveta» №7, 2008 (in Russian).
11. V. Mosalev Neobitaemye nadvodnye apparaty v VMS inostrannyh gosudarstv [Unmanned surface vehicles in the Navy of foreign states]. Zarubezhnoe voennoe obozrenie, №10, 2006 (in Russian).
12. Presentation of briefing by Captain Pete Small, Program Manager, Unmanned Maritime Systems (PMS 406), entitled "Unmanned Maritime Systems Update," January 15, 2019.
13. THE NAVY UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) MASTER PLAN, 23 July 2007.
14. Unmanned Marine Systems - ASVs, USVs & Autonomous Boat Control, January 15, 2019.
15. G Peeters et al Design and build of a scale model unmanned inland cargo vessel: actuation and control architecture. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1357 (2019) 012016.
16. G Peeters et al An unmanned inland cargo vessel: Design, build, and experiments. Ocean Engineering 201 (2020) 107056.
17. G Peeters et al An Inland Shore Control Centre for Monitoring or Controlling Unmanned Inland Cargo Vessels. J. Mar. Sci. Eng. 2020, 8, 758; doi:10.3390/jmse8100758.
18. a-Navigacija ili Kak razvivajutsja v Rossii avtonomnye suda? [e-Navigation or how developing autonomous vessels in Russia] [https://www.korabel.ru/news/comments/a-navigaciya\\_ili\\_kak\\_razvivayutsya\\_v\\_rossii\\_avtonomnye\\_suda.html](https://www.korabel.ru/news/comments/a-navigaciya_ili_kak_razvivayutsya_v_rossii_avtonomnye_suda.html) (30.06.2022).
19. Maritime autonomous surface ships on the horizon. URL: <https://www.gard.no/web/updates/content/27107214/mari-time-autonomous-surface-ships-on-the-horizon> (30.06.2022)

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

**Максим Олегович Франк**, аспирант, кафедра проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: frankmaks95@mail.ru

**Maksim O. Frank**, PhD student, Department of Ship Design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: frankmaks95@mail.ru

**Кирилл Дмитриевич Овчинников**, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: ovchinnikov\_kd@mail.ru

**Kirill D. Ovchinnikov**, Ph.D. (Eng), Associate professor of the Department of Ship Design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ovchinnikov\_kd@mail.ru

**Владимир Александрович Рыжов**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: varyzhov@smtu.ru

**Vladimir A. Ryzhov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: varyzhov@smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.01.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.06.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 30.06.2022.

Научная статья

УДК 629.12.001.24:681.32

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.003>

## Методические противоречия критериев затрат и показателей, связанных с прибылью, при их использовании на начальных стадиях проектирования судов и применение показателя в форме вклада морских ресурсов

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

А.С. Огай<sup>1</sup> ogay\_a@msun.ru

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

**Аннотация.** При определении характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования судов в рамках системного подхода применяются целевые функции и проектные ограничения. Используемые экономические критерии можно отнести к группе минимизируемых затрат или к максимизируемым показателям, связанным с прибылью, рентабельностью, с внутренней нормой прибыли и пр. Использование различных показателей в качестве критериев может приводить к неоднозначности найденных значений оптимальных характеристик и элементов судна. Кроме этого, имеются методические противоречия самих применяемых критериев, связанные с нарушением интересов других субъектов в экономическом окружении при снижении их доходов и прибыли вследствие минимизации затрат того инвестора, с позиций которого ищутся оптимальные характеристики и элементы создаваемого судна, а также противоречия критериев, связанные с перерасходом ресурсов при максимизации прибыли или рентабельности. Использование в качестве целевой функции показателя в форме максимизируемого вклада морских ресурсов частично лишено упоминаемых противоречий, и связано с решением специфических задач: нахождением стоимостного вклада морских ресурсов и определением количества используемых ресурсов по натуральной и денежной величине. Методически морские ресурсы оцениваются как критерий и целевая функция с позиций технологических возможностей их освоения с применением морских судов.

**Ключевые слова:** целевая функция, экономические критерии, проектируемое судно, проектная характеристика, проектный элемент, проектное ограничение, противоречие критерия, морские ресурсы

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского за счет внебюджетных средств

**Для цитирования:** Войлошников М.В., Огай С.А., Огай А.С. Методические противоречия критериев затрат и показателей, связанных с прибылью, при их использовании на начальных стадиях проектирования судов и применение показателя в форме вклада морских ресурсов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 29—36.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.003>

## The methodic contradictions of the cost criteria and the profit-related ones when they are used at the initial stages of ship designing and the use of the criterion in the form of marine resources contribution index

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

Alexey S. Ogai<sup>1</sup> ogay\_a@msun.ru

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

**Abstract.** When determining characteristics and particulars at the initial stages of ship design, the objective functions and design constraints are applied within the framework of a systematic approach. The economic criteria used can be attributed to the group of minimized costs or to maximized indexes related to profit, profitability (the interest rate), internal rate of return, etc. The use of various indexes as the criteria can lead to ambiguity in the found values of the optimal characteristics and particulars of the ship under designing. In addition, there are the methodological contradictions of the applied criteria themselves, associated with the violation of the interests of other entities in the economic environment with a decrease in their income and profit due to minimization of the costs of the investor, from the position of which the optimal characteristics and particulars of the ship are sought under designing, as well as the contradictions of the criteria associated with overspending of resources while maximizing the profit or the profitability. The use of the index in the form of a maximized contribution of marine resources as the objective function is partially devoid of the mentioned contradictions, and is associated with the solution of specific tasks: finding the cost contribution of marine resources and determining the amount of resources used in natural and monetary terms. Methodically, the marine resources are evaluated as a criterion and an objective function from the standpoint of the technological capabilities of their development using merchant ships.

**Keywords:** objective function, economic criteria, ship under designing, design characteristic, design particular, design constraint, contradiction of criteria, marine resources

**Financial Support:** The study was carried out with the financial support of the Maritime State University named adm. G.I. Nevelskoy at the expense of extrabudgetary funds

**For citation:** Michael V. Voyloshnikov, Sergei A. Ogai, Alexey S. Ogai The methodic contradictions of the cost criteria and the profit-related ones when they are used at the initial stages of ship designing and the use of the criterion in the form of marine resources contribution index, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 29—36.

### Введение

Нахождение проектных характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования морских гражданских судов в рамках системного подхода осуществляется с позиций оценки интересов инвесторов с использованием целевых функций и проектных ограничений [1, 2, 5–7]. Используемые экономические критерии обычно относятся к группам минимизируемых затрат или максимизируемой прибыли и связанных с ней других показателей: рентабельности, внутренней нормы прибыли и пр. Различие экономической природы критериев, относящихся к указанным группам, приводящее к неоднозначности найденных с использованием соответствующих целевых функций проектных характеристик и элементов судов, а также рассмотренные в данной работе собственные методические противоречия, имеющиеся у критериев из этих групп ставят актуальный вопрос обобщения используемых критериев и устранения свойственных им противоречий.

#### Противоречия критериев затрат и показателей, связанных с прибылью транспортного судна

Часто применяемый в задачах оценки эффективности новой или создаваемой техники экономический критерий удельных приведенных затрат пригодный для использования в качестве целевой функции на начальных стадиях проектирования для нахождения характеристик и элементов гражданских судов является обобщением показателей: инвестиций в создание судна – затрат на постройку в рыночных ценах, включая затраты на проектирование, т.е. стоимости замещения судна  $RC$ , оборотных средств  $WA$ , годовых эксплуатационных (операционных) расходов  $C$ , показателя эффекта  $Q$  (для транспортного судна – характеристики его годовой провозоспособности, для промыслового – количества осваиваемых в течение года водных биологических ресурсов или произведенной продукции и пр.), причем в составе критерия показатели затрат приводятся к сопоставимому виду, в качестве фактора приведения применяется показатель дисконтирования  $i$ , соответствующий сумме коммерческих рисков и стоимости капитала, а итоговое значение затрат определяется на единицу эффекта  $Q$

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

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

Целевая функция минимизируемого показателя удельных приведенных затрат ( $PW/Q$ ) в зависимости от характеристики размера судна, в частности, дедвейта  $DW$ , и от эксплуатационной скорости  $v_s$  показана на функциональной поверхности (Рис. 1).

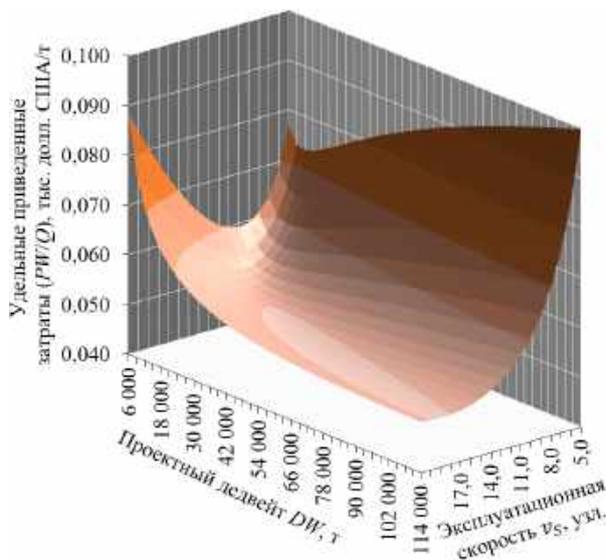


Рис. 1. Зависимость показателя удельных приведенных затрат ( $PW/Q$ ) от характеристики размера транспортного судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$

Критерии эффективности подобные рассмотренному (1), применяемые в качестве целевых функций для определения характеристики на начальных стадиях проектирования судна, которые связаны с минимизацией затрат инвестора, характеризуются определенными противоречиями социально-экономической природы потому что минимизация затрат, осуществляемая непосредственно в интересах инвестора соответствует снижению доходов других субъектов в экономике, и это, в свою очередь, может способствовать стагнации экономического окружения, что противоречит интересам исходного инвестора, который в рассматриваемом случае стремится к минимизации своих затрат.

Напротив, мотивация к неограниченному увеличению доходов, прибыли и связанных показателей (рентабельности, внутренней нормы прибыли и пр.), выражаемая соответствующими экономическими критериями при их использовании в качестве целевых функций для нахождения оптимальных характеристик на начальных стадиях проектирования судна, связана с экологическим противоречием перерасхода ресурсов в их экономическом определении, что также входит в противоречие с исходными интересами инвестора, связанным, также, с защитой среды не только в экологическом смысле, но и с точки зрения сохранности и рационального использования

ресурсов, что служит предпосылкой и условием поступления инвестору доходов и прибыли.

Критерий внутренней нормы прибыли  $IRR$  не содержит в своей структуре показателя эффекта  $Q$ , но охватывает показатели совокупного годового дохода  $I$  и годовых эксплуатационных расходов  $C$ , являющихся зависимыми денежными потоками, а также показатели инвестиций ( $RC$  и  $WA$ )

$$IRR = (I - C) / (RC + WA) \quad (2)$$

Целевая функция максимизируемого показателя внутренней нормы прибыли  $IRR$  в зависимости от характеристики размера судна, в частности, дедвейта  $DW$ , и от эксплуатационной скорости  $v_s$  показана на функциональной поверхности (Рис. 2).

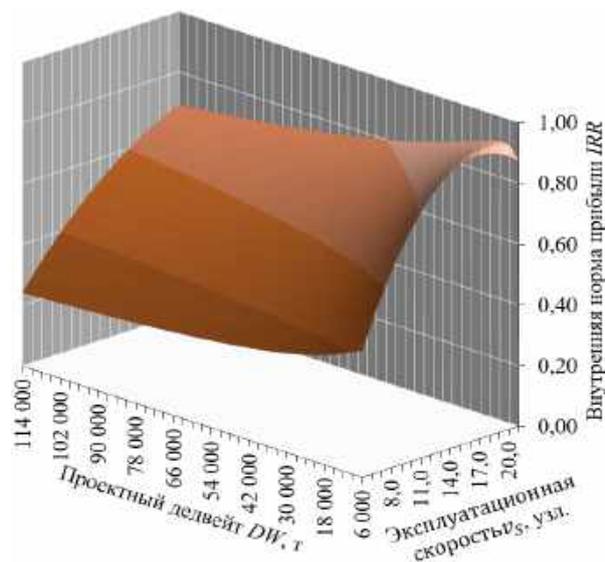


Рис. 2. Зависимость показателей внутренней нормы прибыли  $IRR$  от характеристики размера транспортного судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$

Экономический показатель внутренней нормы прибыли формально отличается от показателя рентабельности инвестиций, т.к. корректируется на величину инфляции, и при малой инфляции можно на начальных стадиях проектирования судна считать показатели рентабельности и внутренней нормы прибыли методически близкими.

По графическим функциональным поверхностям (Рис. 1 и 2) целевых функций:  $(PW/Q)$  и  $IRR$  видно, что оптимальные значения характеристик размера транспортного судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и эксплуатационной скорости  $v_s$ , найденные по этим критериям не совпадают, т.е. требуются дальнейшие исследования для определения оптимальных характеристик судна.

Кроме этого, использованные критерии:  $(PW/Q)$  и  $IRR$ , как отмечено, имеют собственные методические противоречия: социально-экономическое при экономии затрат и экологическое – при перерасходе ресурсов вследствие максимизации прибыли.

При создании морских гражданских судов, других производственных мощностей морских предприятий, а также морских технических средств иных, чем гражданские суда, при определении их оптимальных характеристик и при использовании для этого критериев оптимальности нужно стремиться избегать методических противоречий используемых критериев, связанных с возможным угнетением экономического окружения или с перерасходом морских ресурсов.

Для пояснения возможных путей преодоления рассматриваемых противоречий уместен пример из сферы экономики недвижимости.

При определении оптимального варианта застройки земельного участка обычно выбирается такое здание, для которого характерен наибольший вклад застроенного участка земли в стоимость целостного объекта, включающего как здание, так и участок. Критерий в форме максимизируемого вклада естественных ресурсов (застроенного участка) в стоимость комплексного объекта, включающего эти ресурсы и их улучшения в экономических терминах сам по себе не означает минимизацию затрат, являющихся доходами контрагентов, а также мотивирует инвестора к сохранению ценности и полезных качеств участка (т.е. используемых ресурсов), что способствует бережному отношению к ресурсам и ограничению их перерасхода – чрезмерного использования, в частности, чрезмерной застройки участков, при которой вклад ресурсов в стоимость комплексного объекта ресурсов с улучшениями был бы меньше вследствие снижения качества ресурсов. В том числе, такой подход к сохранению и воспроизводству ценности ресурсов является позитивным по экологической оценке.

Морскими ресурсами является часть морской среды, в отношении которой выражены интересы инвестора. Под морской средой в методологическом смысле может подразумеваться не только физическая водная среда, но море как водоем, включая характеристики его географического положения, размеры и климатические условия, биологическое разнообразие и продуктивность, характеристики морских грузопотоков (протяженность линий и интенсивность, вид грузов), технологический и промышленный уровень судостроения и гидротехнического строительства на берегах и иные свойства морской среды, которые связаны с экономическими интересами инвестора, морские акватории, пригодные для развития промышленной аквакультуры с учетом географии и гидрологии побережий, геологические ресурсы и запасы ископаемых морского дна, доступная для использования энергия приливов или волн, инженерные возможности морской транспортной и иной промышленной деятельности на побережьях, зависящие от численности населения, от этнической и социальной структуры, от национальных особенностей, традиций и укладов, ресурсы промышленного и экономического потенциала, характерного для населения, проживающего на берегах морей и использующего морские ресурсы для жизни и деятельности.

Морскими ресурсами в методологическом отношении может выступать неограниченная совокупность характеристик моря, служащая мотивом развития экономики на побережьях и отраслей промышленности: судостроения, транспорта, строительства, энергетики, пищевой промышленности, переработки водных биологических ресурсов, их хранения и доставки потребителю, транспортировки добытых в море энергоносителей и передачи энергии, туристической деятельности, науки, обороны и др. отраслей, развитие которых мотивируется целями освоения морских ресурсов.

К числу объектов, которые могли бы быть отнесены к понятию морские ресурсы, можно причислить море в целом, как природный объект, в частности, как объект восстановления состава атмосферы, имея в виду рекреационные функции моря, или, например, море как среду сохранения биологического многообразия и пр., если упоминаемые рекреационные и биологические ресурсы моря оцениваются с позиций промышленных, экономических, нормативных, научных, правовых, а также иных подходов.

Понятие морских ресурсов непосредственно связано со стратегией инвестора, которая направлена на их освоение и для этой цели обычно создаются и используются морские гражданские суда.

#### Показатели количества осваиваемых морских ресурсов и их стоимостного вклада

Для понимания возможности применения аналогичного подхода, связанного с максимизацией вклада морских ресурсов в стоимость создаваемых судов и иных активов морских предприятий, в форме критерия оптимальности принимаемых решений при создании указанных объектов и при нахождении их оптимальных характеристик и элементов нужно иметь ответы на вопросы определения следующих показателей:

1. Количественный показатель морских ресурсов, связанных с судном.

Этот показатель в экономике недвижимости имеет вполне очевидное определение и участок территории можно охарактеризовать его площадью и местоположением, а также некоторыми иными характеристиками.

Однако ответ на вопрос определения количественных факторов, характеризующих морские ресурсы, соотносимые с судном или иным активом морского предприятия не столь очевиден, и нужны: методический подход и расчетная методика.

2. Показатель величины вклада морских ресурсов в стоимость судна или иного актива морского предприятия.

Максимизируемый вклад морских ресурсов в стоимость судна или иного актива морского предприятия, в отношении которого можно вести обособленный учет показателей, можно найти как разность, в частности, на нулевую дату, показателей

текущей стоимости денежного потока совокупного дохода:  $(I/i)/(1+i)$  и текущей стоимости потока всех затрат:  $(C/i + RC + WA)$ , как

$$NPV = (I/i)/(1+i) - (C/i + RC + WA). \quad (3)$$

Показатель вклада стоимости морских ресурсов (3) соответствует экономической аналогии вклада земельного участка в стоимость недвижимого имущества.

Зависимость экономического показателя вклада морских ресурсов (по оценке чистой текущей стоимости  $NPV$ ) от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_s$  показана на функциональной поверхности (Рис. 3).

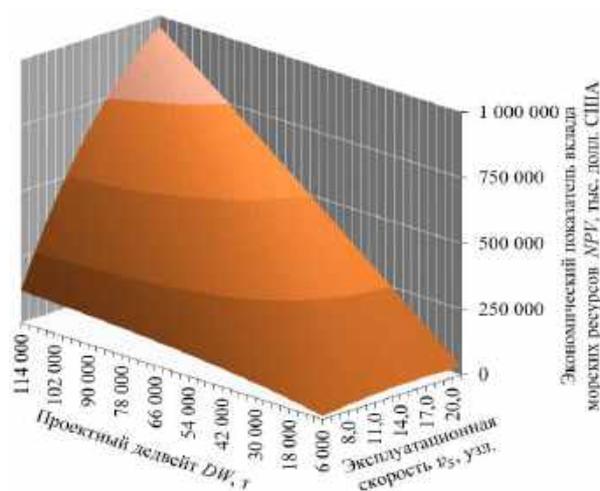


Рис. 3. Зависимость показателя вклада морских ресурсов (по оценке чистой текущей стоимости  $NPV$ ) от проектного дедвейта  $DW$  (характеристики размера судна) и от эксплуатационной скорости  $v_s$

При использовании критерия максимизируемого вклада морских ресурсов (3) для нахождения оптимальных характеристик судна (или иного актива морского предприятия) нужно придерживаться системного принципа, при котором должны выполняться одно из двух проектных ограничений:

ресурсное ограничение:  $Q, I$  или  $(I/i)/(1+i)$  – характеристика количества освоенных морских ресурсов, служащая ограничением в денежном выражении или в натуральном, принимая макроэкономический показатель суммарных рисков  $i$  тоже как ограничение;

финансовое ограничение, при котором размер инвестиций (субсидий), в частности, по их текущей оценке на начальный момент:  $(C/i + RC + WA)$  должен быть предварительно найден (или подразумевается найденным) как характеристика более общей системы, чем судно (или иной актив морского предприятия).

Количество освоенных транспортным судном морских ресурсов (потоков перевозимых грузов) по их денежной оценке:  $(I/i)/(1+i)$  показано на графической функциональной поверхности (Рис. 4) в зависимости от размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_S$ .

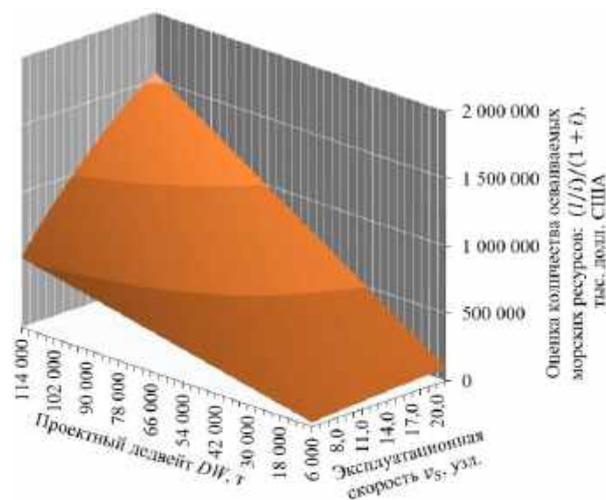


Рис. 4. Зависимость количества осваиваемых транспортным судном морских ресурсов по денежной оценке их количества от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_S$

В расчете на единицу количества освоенных морских ресурсов их вклад  $NPI$  в стоимость судна (или иного актива морского предприятия) равен

$$NPI = NPV / ((I/i)/(1+i)), \quad (4)$$

$$\text{или } NPI = 1 - (C/i + RC + WA) \times i \times (1+i) / I. \quad (5)$$

Зависимость экономического показателя вклада морских ресурсов  $NPI$  (по оценке чистой текущей стоимости), осваиваемых транспортным судном, в расчете на единицу количества ресурсов по их денежной оценке:  $(I/i)/(1+i)$  от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_S$  показана на графической поверхности целевой функции (Рис. 5).

Положение максимума на графической поверхности целевой функции (Рис. 5) показывает оптимальные значения размера транспортного судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и эксплуатационной скорости  $v_S$ , которые соответствуют наибольшему вкладу осваиваемых морских ресурсов (грузовых потоков)  $NPI$  в стоимость судна на единицу количества осваиваемых ресурсов:  $(I/i)/(1+i)$ .

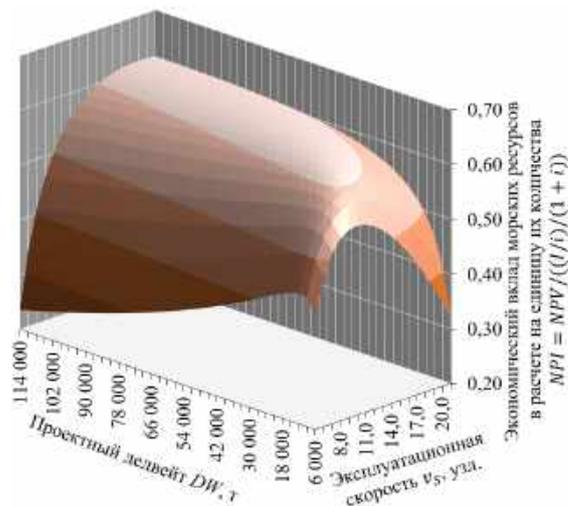


Рис. 5. Зависимость экономического показателя вклада морских ресурсов  $NPI$ , осваиваемых транспортным судном, в расчете на единицу их количества по денежной оценке ресурсов от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эксплуатационной скорости  $v_S$

Выбор характеристик судна по указанному критерию в максимальной степени свободен от методических противоречий критериев: противоречия минимизируемых удельных приведенных затрат, связанного с сокращением доходов субъектов экономического окружения, и противоречия максимизируемого показателя внутренней нормы прибыли, связанного с тенденциями перерасхода морских ресурсов.

#### Показатели количества морских ресурсов, осваиваемых промысловым судном и их стоимостного вклада

Целевые функции в форме удельных приведенных затрат  $(PW/Q)$  и в форме внутренней нормы прибыли  $IRR$ , для морского стального промыслового судна, найденные по формулам (1 и 2), показаны на графических функциональных поверхностях (Рис. 6 и 7) в зависимости от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $Ne$ .

Анализ графических зависимостей (Рис. 6 и 7) показывает что оптимальные значения характеристик промыслового судна, найденные по рассмотренным критериям:  $(PW/Q)$  и  $IRR$  не совпадают.

Кроме этого, использованные критерии имеют собственные методические противоречия, влияющие на качество найденного проектного решения – оптимальных характеристик промыслового судна: социально-экономическое при экономии затрат, что сопровождается снижением доходов субъектов экономического окружения, и экологическое как возможность перерасхода ресурсов вследствие максимизации прибыли.

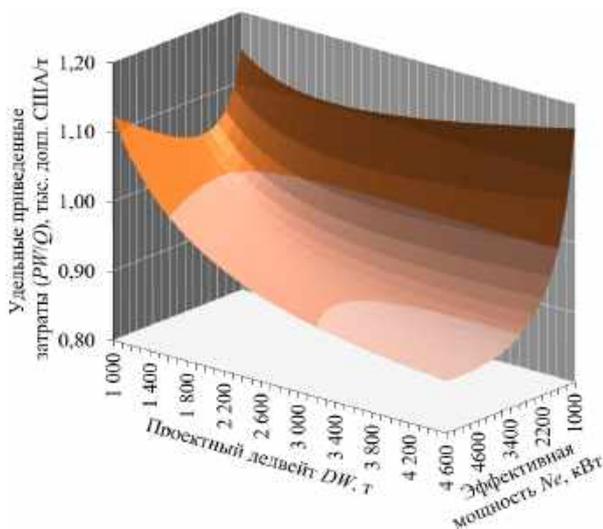


Рис. 6. Зависимость показателя удельных приведенных затрат ( $PW/Q$ ) для промыслового судна от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $N_e$

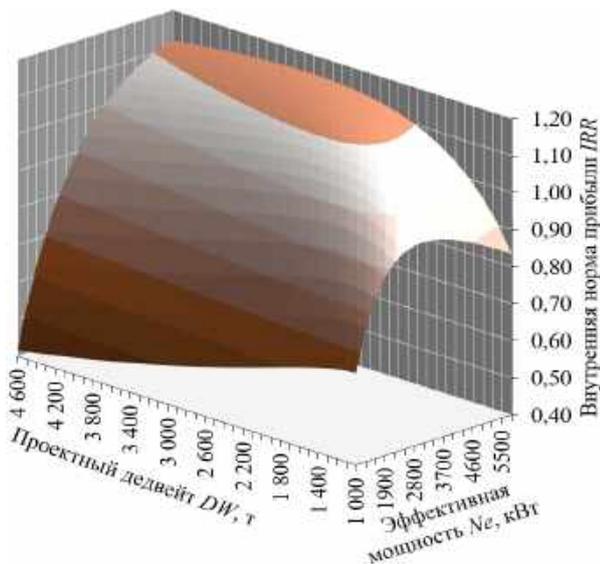


Рис. 7. Зависимость показателя внутренней нормы прибыли  $IRR$  от характеристики размера промыслового судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $N_e$

Показатель вклада морских ресурсов  $NPV$  (по оценке чистой текущей стоимости), осваиваемых промысловым судном, в зависимости от характеристики размера промыслового судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $N_e$ , найденный по формуле (3) показан в форме графической функциональной поверхности (Рис. 8).

В рамках системного подхода можно использовать показатель вклада морских ресурсов  $NPV$  (по оценке чистой текущей стоимости, Рис. 8) в качестве целевой функции при условии наложения одного из двух рассмотренных выше проектных ограничений: ресурсного ограничения показателей:  $Q$ ,  $I$  или  $(I/i)/(1+i)$  – характеристик количества осваиваемых морских ресурсов или финансового ограничения, при котором размер инвестиций по их

текущей оценке на начальный момент:  $(C/i + RC + WA)$  должен быть найден как характеристика более общей системы, чем судно (или иной актив морского предприятия), например, как характеристика, связанная с капитализацией морского предприятия.

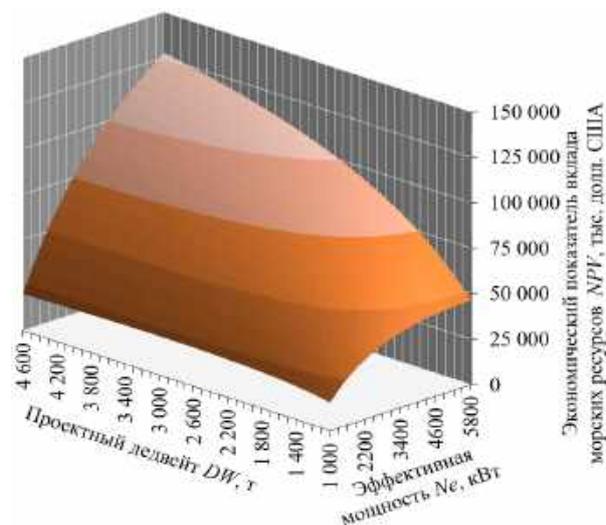


Рис. 8. Зависимость экономического показателя вклада морских ресурсов  $NPV$  (по оценке чистой текущей стоимости), осваиваемых промысловым судном, от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $N_e$

Зависимость количества осваиваемых промысловым судном морских ресурсов по денежной оценке:  $(I/i)/(1+i)$  от размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $N_e$  показана на графической функциональной поверхности (Рис. 9).

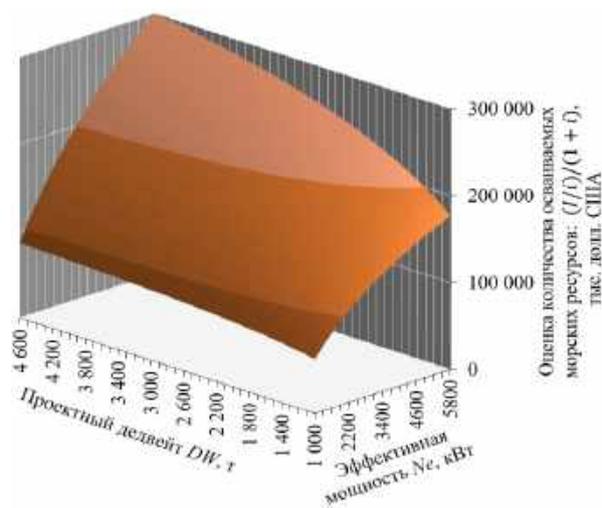


Рис. 9. Зависимость количества осваиваемых промысловым судном морских ресурсов по денежной оценке:  $(I/i)/(1+i)$  от размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $N_e$

Показатель количества осваиваемых ресурсов используется для нахождения вклада морских ресурсов  $NPI$  (по оценке чистой текущей стоимости) в расчете на единицу этого количества по формуле (5).

Зависимость количества осваиваемых промышленным судном морских ресурсов по денежной оценке:  $(I/i)/(1+i)$  от размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $N_e$  показана на графической функциональной поверхности (Рис. 9).

Зависимость экономического показателя вклада морских ресурсов  $NPI$  (по оценке чистой текущей стоимости) в расчете на единицу их количества:  $(I/i)/(1+i)$  от размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $N_e$  показана на графической функциональной поверхности (Рис. 10).

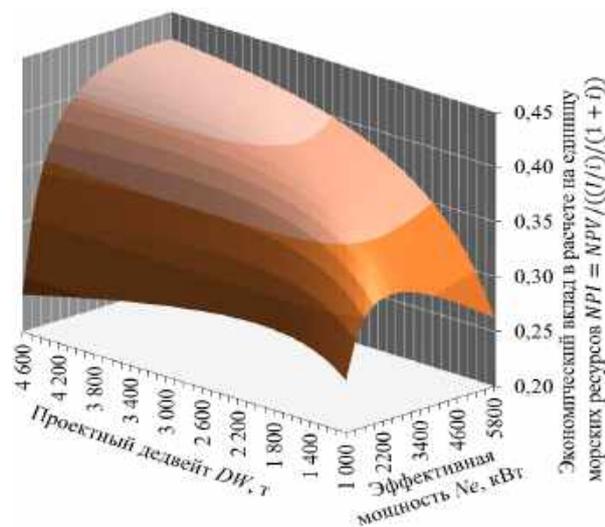


Рис. 10. Зависимость экономического показателя вклада морских ресурсов  $NPI$  (по оценке чистой текущей стоимости) в расчете на единицу их количества: от характеристики размера судна (проектного дедвейта  $DW$ ) и от эффективной мощности  $N_e$

Положение максимума на графической поверхности целевой функции (Рис. 10) показывает оптимальные значения размера морского стального промышленного судна (его проектного дедвейта  $DW$ ) и эффективной мощности  $N_e$ , которые соответствуют наибольшему вкладу осваиваемых морских ресурсов

$NPI$  на единицу стоимостной оценки количества осваиваемых ресурсов:  $(I/i)/(1+i)$ .

Выбор характеристик промышленного добывающе-перерабатывающего судна по указанному критерию в максимальной степени свободен от методических противоречий критериев: удельных приведенных затрат и показателя внутренней нормы прибыли.

### Заключение

Методические противоречия используемых в качестве целевых функций при нахождении характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования морских гражданских судов минимизируемых критериев, основанных на учете затрат, связанные с минимизацией доходов других субъектов в экономическом окружении, и используемых в указанных целях максимизируемых показателей внутренней нормы прибыли или рентабельности, связанные с тенденциями перерасхода ресурсов при максимизации этих показателей, могут быть в основной части преодолены при использовании в качестве целевой функции критерия в форме экономического показателя вклада морских ресурсов в стоимость создаваемого судна, если его оценивать в условиях хозяйственного расчета и самокупаемости.

Стоимостная оценка вклада морских ресурсов соответствует при этом чистой текущей стоимости создаваемого судна, т.е. разности текущей стоимости ресурсов, доступ к которым открывает создаваемое судно, и текущей стоимости всех эксплуатационных и инвестиционных издержек.

Стоимость издержек в то же время может говорить о величине наибольшего размера субсидий в создание судна, т.е. стоимость издержек соответствует системному финансовому ограничению.

А количество осваиваемых морских ресурсов, т.е. любых возможностей ведения экономической морской промышленной деятельности в форме использования создаваемых гражданских судов, оцениваемое как эффект или как доход при освоении этих ресурсов, также выступает как системное ресурсное ограничение или как функция полезности (показатель эффекта) в составе целевой функции.

### Литература

1. Войлошников М.В. Морские ресурсы и техника: эффективность, стоимость, оптимальность. Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2002. 586 с.
2. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т. 1: Описание системы «Корабль». Т. 2: Анализ синтез системы «Корабль». СПб. : Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014.
3. Канторович Л.М. Экономический расчет наилучшего использования ресурсов. М. : Изд-во АН СССР, 1959.
4. Огай С.А., Войлошников М.В. Оптимизация проектных характеристик судна в составе комплекса судоходной компании // Морские интеллектуальные технологии: науч. журн. 2011. № 4 (14).
5. Пашин В.М. Оптимизация судов. Л. : Судостроение, 1983.
6. Voyloshnikov M.V., Ogai S.A., Ogai A.S. The systematic approach in determining of the project characteristics of the vessel in the complex of the shipping company and the software models of the different levels // The 25th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2011, Incheon.
7. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Systemic approach of design characteristics determining of multifunctional ships for frozen seas: textbook. – Vladivostok: Publishing house of State Maritime University named Admiral G.I. Nevelskoi, 2021. – 375 p.

### References

1. Vojloshnikov M.V. Morskie resursy i tekhnika: effektivnost', stoimost', optimal'nost'. Vladivostok [The ocean resources and engineering: the efficiency, the value and the optimality] : Izd-vo DVGTU, 2002. 586 s.
2. Gajkovich, A.I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchih korablej i sudov [The designing theory of the displaces combat vessels and merchant ships] : v 2 t. T. 1: Opisanie sistemy «Korabl'». T. 2: Analiz sintez sistemy

- «Korabl'». SPb. : Izd-vo NIC MORINTEKH, 2014.
3. Kantorovich L.M. Ekonomicheskiy raschet nailuchshego ispol'zovaniya resursov [The economic determining of the best use of the resources]. M. : Izd-vo AN SSSR, 1959.
  4. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Optimizatsiya proektnykh harakteristik sudna v sostave kompleksa sudohod-noj kompanii [Optimization of ship design characteristics in the composition of navigation company complex] // Morskie intellektual'nye tekhnologii: nauch. zhurn. 2011. № 4 (14).
  5. Pashin V.M. Optimizatsiya sudov [Design optimization of ships]. L. : Sudostroenie, 1983.
  6. Voyloshnikov M.V., Ogai S.A., Ogai A.S. The systematic approach in determining of the project characteristics of the vessel in the complex of the shipping company and the software models of the different levels // The 25th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2011, Incheon.
  7. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Systemic approach of design characteristics determining of multifunctional ships for frozen seas: textbook. – Vladivostok: Publishing house of State Maritime University named Admiral G.I. Nevelskoi, 2021. – 375 p.

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

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

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

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

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

**Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (engineering), Associate professor, Professor of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50–a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russian Federation; tel.: +7 (423) 241–4968, e-mail: ogay@msun.ru

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2022.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.004>

## Исследования напряженно-деформированного состояния днища с учетом внешней конструктивной защиты от грунта

В. А. Кулеш<sup>1</sup> vkulesh@mail.ru, Хиеп Чунг Фам<sup>2</sup> phiepast07@gmail.com

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

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет

**Аннотация.** При взаимодействии с грунтом корпуса могут получать серьезные повреждения, которые снижают их долговечность и могут потребовать вывода судов из эксплуатации. Усиления корпусов судов могут включать как внутренние конструктивные решения, так и внешнюю конструктивную защиту. Российский морской регистр судоходства в своих Правилах предусматривает возможность применения внешней конструктивной защиты корпуса. Однако, вопросы регламентации внешней конструктивной защиты, размеров ее элементов и влияния на корпус практически не рассмотрены. Существующих решений для защиты судов от грунта мало и опыт эксплуатации пока не накоплен. В данной работе выполнен анализ напряженно-деформированного состояния конструкций в упругой стадии и исследования несущей способности в области больших пластических деформаций. Показано влияние условий загрузки отсека и конструктивных элементов на уровень напряжений. Результаты работы направлены на развитие методики проектирования внешней конструктивной защиты корпусов от грунта для новых и находящихся в эксплуатации судов.

**Ключевые слова:** корпуса судов, взаимодействие с грунтом, повреждения, внешняя конструктивная защита, напряженно-деформированное состояние.

**Для цитирования:** Кулеш В.А., Фам Чунг Хиеп. Исследования напряженно-деформированного состояния днища с учетом внешней конструктивной защиты от грунта, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 37—43

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.004>

## The stress-strain state analysis of the vessel's bottom with the external structural protection from ground

Victor A. Kulesh<sup>1</sup> vkulesh@mail.ru, Hiep Trung Pham<sup>2</sup> phiepast07@gmail.com

<sup>1</sup>Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

<sup>2</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** The vessel hulls can receive serious damages, which reduce their durability and may require decommissioning of vessel when the interaction with the ground happened. Reinforcement of vessel hulls can include both internal structural solutions and external structural protection. The Russian Maritime Register of Shipping provides for the possibility of applying external structural protection for vessel hull in its Rules. However, the issues of regulating the external structural protection, the size of its elements, and the effect on the case are practically not considered. There are few existing solutions for protecting vessels from ground, and the operating experience has not yet been accumulated. The stress-strain state analysis of structures in the elastic stage and studies of the bearing capacity in large plastic deformations are carried out in the papers. The influence of loading conditions of the compartment and structural elements on the stress level is shown. The work results are aimed at developing a methodology for designing external structural protection from the ground for hulls of vessels, which are new or in service.

**Key words:** vessel hulls, interaction with the ground, damage, external structural protection, stress-strain state.

**For citation:** Victor A. Kulesh, Hiep Trung Pham, The stress-strain state analysis of the vessel's bottom with the external structural protection from ground, Marine intellectual technologies 2022. № 3 part 1. P. 37—43

### Введение

Взаимодействия судов с грунтом имеют широкий спектр сценариев – от непредвиденных аварий до систематических и плановых операций с осушениями корпусов на грунте. Последствиями таких сценариев могут быть повреждения корпусных конструкций, а иногда и гибель судов. Российский морской регистр судоходства (РМРС) с 2017 года рассматривает сценарии контактов судов с грунтом как эксплуатационные случаи и оговаривает специальные требования (суда NAABSA) [1].

Посадка судов на грунт часто сопровождается последующим осушением для проведения грузовых

операций на необорудованный берег. Процедура важна для многих регионов, особенно арктических и Дальнего Востока [2]. В процессе осушения силы поддержания моря уменьшаются и замещаются нарастающими силами давления грунта на днище. Из-за неровной поверхности и неоднородности грунта сила давления распределяется неравномерно по поверхности днища и может приводить к повреждениям его элементов. При многократных осушениях повреждения накапливаются и могут привести к разрушению днища с потерей водонепроницаемости корпуса. Во избежание разрушений применяют как внутренние усиления, так и внешнюю защиту [3].

Внешняя конструктивная защита (ВКЗ) днища от грунта является актуальной, но применяется редко и мало изучена. Правила РМРС оговаривают возможность применения ВКЗ в виде фальшкилей. Регламентация формы и размеров фальшкилей отсутствует. Практические решения для защиты днища судов от грунта не многочисленны.

Техническое решение для снижения последствий аварийной посадки судна на мель разработано Бураковским П.Е. и представлено в работах [4, 5]. Решение сводится к применению в стенках рамного днищевого набора «сминающихся прокладок» в виде труб. Решение предложено для района машинного отделения и нацелено на сохранение центровки валов и работоспособности двигателей после повреждений днища.

В работе [6] представлено другое техническое решение для днища с гофрами обшивки вдоль судна. Технологически это решение представляется довольно сложным. Указанные решения ориентированы на стадию проектирования. Однако вопросы усиления и защиты днища от грунта имеют актуальность и для эксплуатируемых судов.

На рис. 1 показана схема ВКЗ днища, которая

подобна бортовым привальным брускам, она может быть реализована на судах в эксплуатации, и получила патенты [7-8]. Фальшкили располагают по одному на борт с удалением от диаметральной плоскости (ДП), по возможности, в районе скулы, имеющей повышенную прочность за счет часто установленных скуловых бракет и кривизны обшивки.

ВКЗ может иметь гнутую или коробчатую форму обшивки. Горизонтальный (опорный) лист предлагается располагать на уровне или несколько ниже горизонтального киля. Опорный лист поддерживается двумя вертикальными или наклонными продольными листами, а также внутренними поперечными бракетами. Соединение ВКЗ с корпусом судна предусматривает продольные подкладные полосы.

Решение, благодаря вариации толщин, размеров и углов положения элементов ВКЗ, дает возможности для оптимизации и снижения металлоемкости. Оно обеспечивает высокую устойчивость положения судов с килеватостью на грунте. Однако, ряд вопросов по условиям взаимодействия ВКЗ с корпусом и влиянию на напряженно-деформированное состояние остаются открытыми.

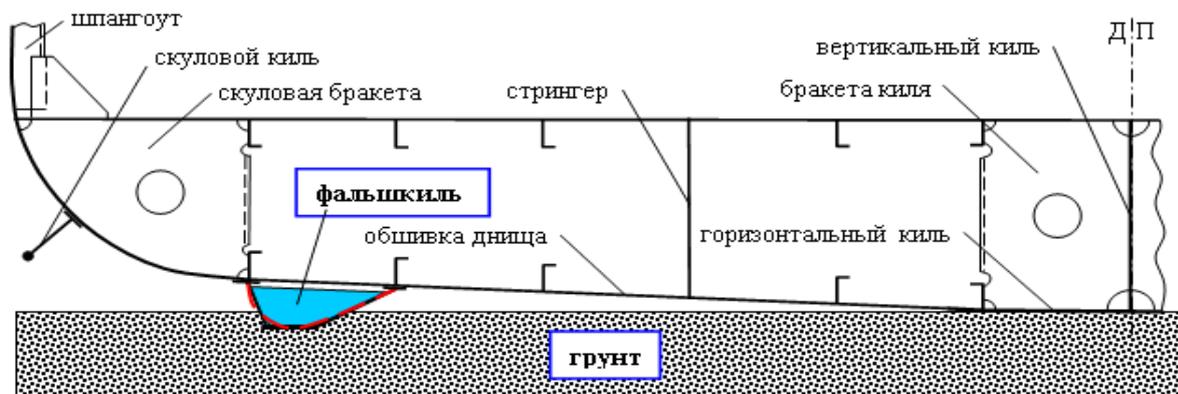


Рис. 1. Конструктивная схема ВКЗ днища

### 1. Сведения о судне, корпусе и отсеке

Для анализа выбрано небольшое судно японской постройки водоизмещением 716 тонн с размерами: длина расчётная - 40 м, ширина - 8 м, высота борта - 3,5 м и осадка 3,1 м (рис.2).



Рис. 2. Вид судна

Судно ориентировано на работу с грузовыми операциями в устьях рек западной Камчатки, возможностью посадки на грунт и полного осушения корпуса [9].

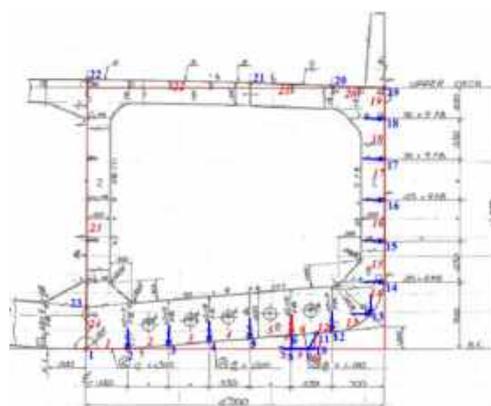


Рис. 3. Сечение по танку (номера узлов и элементов)

Судно предназначено для перевозки различных грузов. Оно имеет один грузовой трюм с размерами люка 14,3×5,5 м. В нос и в корму от трюма выделены грузовые танки длиной до 5 м. В районе трюма имеется двойное дно высотой до 0,8 м и двойные борта шириной до 1,25 м. Корпус разбит поперечными переборками на 7 отсеков. Грузовые танки имеют продольную переборку в ДП. Учитывая

пониженную живучесть (одинарный корпус) для анализа выбран отсек в районе танка, рис.3.

Система набора в районе танков продольная. Флоры и рамные шпангоуты установлены через 3 шпации. В районе танков наружная обшивка днища толщиной 8 мм, поддерживается продольными балками из полос 100×9. Флоры имеют толщину стенок 8 мм.

## 2. Анализ напряжений шпангоутной рамы

Рассматриваемый отсек включает 2 шпангоутные рамы. ВКЗ позиционирована между 5 и 6 продольными балками с удалением от ДП на 2,75 м. В поперечном сечении ВКЗ включала 3 элемента: горизонтальный лист, вертикальный лист в плоскости 5-ой продольной балки и наклонный лист (угол от вертикали 22,4°). Размеры элементов ВКЗ показаны на рис. 4.

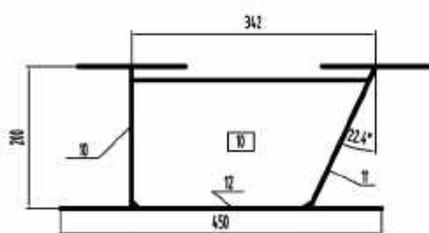


Рис. 4. Схема сечения ВКЗ от грунта

Расчетная нагрузка грунта на отсек по Правилам РС [1] составляет 134 тонны. На ВКЗ одного борта в пределах рамной шпации приходится 22,3 т. Горизонтальная полоса ВКЗ шириной 450 мм воспринимает давление 295 кПа, если горизонтальный киль не касается грунта.

Рассмотрены случаи пустого и полностью заполненного танка. В последнем случае флор воспринимает усилия от продольных балок до 32 кН. Аналогично нагружены продольные балки борта,

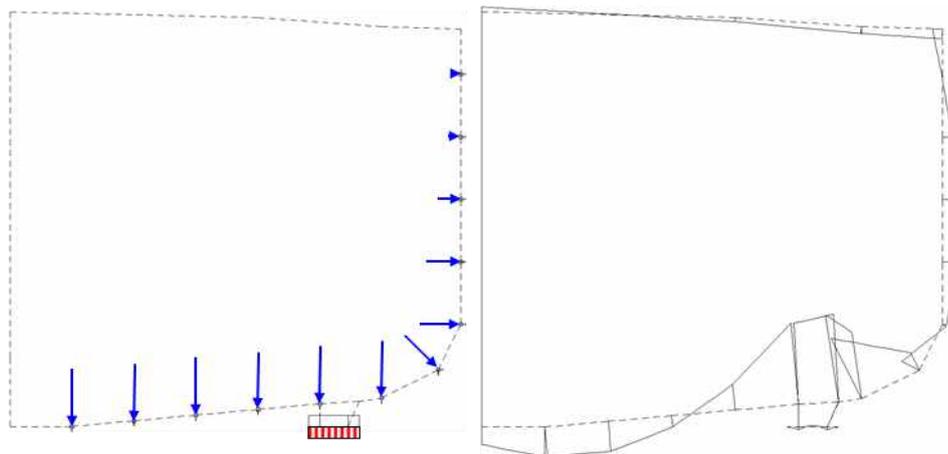


Рис. 5. Схема нагрузок на шпангоутную раму и на ВКЗ от грунта и эпюра изгибающих моментов (справа)

Учитывая, что по действующим Правилам РС коэффициент допускаемых напряжений для флоров равен 0,6, в данном случае прочность рамных связей корпуса обеспечена. В отношении элементов ВКЗ опыт нормирования напряжений и запасов на износ пока отсутствует. Но полученные результаты показывают принципиальную возможность

рис.5 (слева).

Анализ напряжений шпангоутной рамы с ВКЗ выполнен методом конечных элементов (МКЭ) по программе FESTA с учетом следующих сценариев загрузки и влияния износа:

1. Танк пустой, износов нет, нагрузка грунта только на ВКЗ (базовый случай для сравнений),
2. Танк заполнен полностью, износов нет, нагрузка грунта только на ВКЗ,
3. Танк пустой, износов нет, нагрузка грунта на ВКЗ и частично на киль,
4. Танк пустой, износы всех связей 30%, нагрузка грунта только на ВКЗ.

Расчеты показали:

1. С удалением ВКЗ от ДП изгибающие моменты во флоре от сил взаимодействия с грунтом уменьшаются, но изгибающие моменты от противодавлений груза увеличиваются. Это важно учитывать при выборе положения ВКЗ.
2. Для выбранного положения ВКЗ наличие противодавлений со стороны танка дает положительный эффект. Напряжения флора уменьшились на 18%. Напряжения в элементах ВКЗ также уменьшились на 15%.
3. При совместном касании грунта ВКЗ и горизонтальным килем нагрузки приняты пропорциональными их ширинам. Эффект также положительный. Напряжения во флоре уменьшились на 38%. Напряжения в элементах ВКЗ уменьшились на 53%.
4. При отсутствии износов связей (построечных толщинах) наибольшие напряжения в ВКЗ ниже, чем во флоре.
5. При наличии износов всех связей на 30% напряжения возрастают во флорах на 43%, а в элементах ВКЗ на 90%. При этом напряжения ВКЗ уже превышают напряжения флоров в 1,2 раза.
6. При указанных износах наибольшие напряжения во флорах не превышают 48%, а в элементах ВКЗ - 58% от напряжений текучести.

разработки эффективных решений с применением ВКЗ.

Для ВКЗ, кроме рассчитанных напряжений от действия грунта и учета противодавлений грузов, возможно их повышение за счет изгиба ВКЗ между флорами и общего изгиба корпуса судна на грунте. Смещение ВКЗ в район частого размещения

скуловых бракет позволяет снизить роль изгиба между флорами. Участие ВКЗ в общей продольной прочности корпуса также не очевидно. Она может быть локальной вдоль судна или секционной со скользящими соединениями.

### 3. Анализ местных напряжений

Несмотря на показанную возможность обеспечения приемлемого уровня усилий взаимодействия элементов ВКЗ и связей корпуса, а также наибольших номинальных напряжений, роль местных напряжений также высока. Особенно при установке ВКЗ в районах с продольной системой набора и наличии разного рода вырезов. Для анализа местных напряжений и влияния соединительных элементов расчеты выполнены в программе SolidWorks.

Фрагмент модели днищевой конструкции включал следующие элементы:

- днищевую обшивку толщиной 8 мм;
- флор таврового сечения 8x600/9x90 мм с круглыми вырезами диаметром 150 мм;
- продольные днищевые балки 9x150 мм, расположенные с интервалом 0,55 м;
- вертикальные ребра жесткости 9x65 мм по стенке флора;
- заделки 8x90x100 мм вырезов для прохода продольных балок;
- дополнительные кницы продольных балок 8x100x100 мм со стороны, где нет ребер жесткости;
- внешнюю конструктивную защиту (рис. 4).

Расчетная нагрузка грунта на ВКЗ составляла 22,3 тонны и прикладывалась к горизонтальной полосе в виде давления 295 кПа. Всего рассмотрено 5 случаев для оценки влияния дополнительных конструктивных элементов (заделка выреза, кница балки и поперечная бракета ВКЗ):

1. Базовый (конструкция как на судне).
2. Кница (дополнительно к ребру жесткости).
3. Заделка (выреза продольной балки).
4. Кница и заделка (совместно).
5. Базовый, но ВКЗ с поперечной бракетой.

По результатам расчетов (износы не учитывались) наибольшие приведенные напряжения сведены в табл. 1 и отражены на рис.6-10.

Таблица 1

Наибольшие приведённые напряжения (МПа) в связях и прогибы

Элемент/случай	1	2	3	4	5
Горизонтальный	37	37	37	37	35
Вертикальный	76	71	77	72	76
Наклонный	86	84	85	84	80
Обшивка	54	50	50	46	56
Балка	108	90	107	76	105
Ребро	177	89	111	84	177
Флор	134	96	111	96	138
$f_{MAX}$ , мм	0.71	0.70	0.70	0.70	0.51

Результаты расчетов показали:

1. Вертикальное ребро жесткости является наиболее слабым звеном конструкции (177 МПа) в базовом случае – по проекту судна (см. рис.6).

2. Кница в соединении балки и флора существенно уменьшает напряжения: для балки – 1,2 раза, для выреза во флоре – в 1,4 раза, а для ребра жесткости – в 2 раза (см. рис. 7).

3. Заделка выреза для балки дает меньший эффект, чем кница. Напряжения балки практически не меняются, но в ребре уменьшаются в 1,6 раза, а по вырезу флора – 1,2 раза (см. рис. 8).

4. Сочетание заделки и кницы дает наибольший эффект, но в основном из-за роли кницы, влияние заделки мало (см. рис. 9).

5. Поперечная бракета внутри ВКЗ повышает жесткость горизонтальной полосы, но практически не снижает напряжения в связях корпуса (рис.10). Следовательно, частая установка бракет не даст большого эффекта.

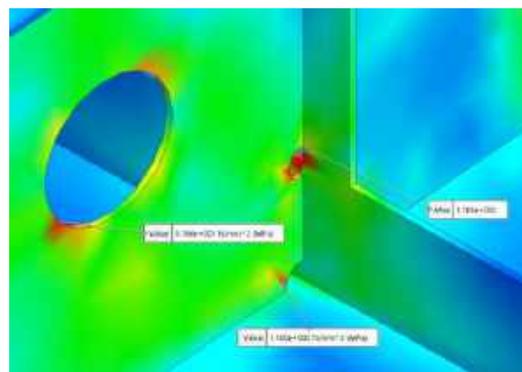


Рис. 6. Места наибольших напряжений (случай 1, базовый)

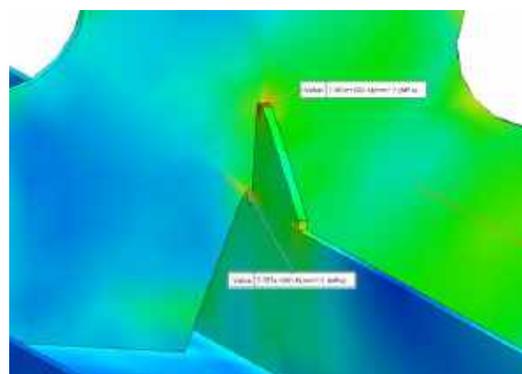


Рис. 7. Места наибольших напряжений (случай 2)

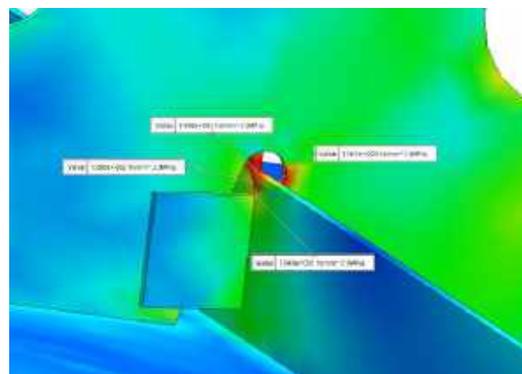


Рис. 8. Места наибольших напряжений (случай 3)

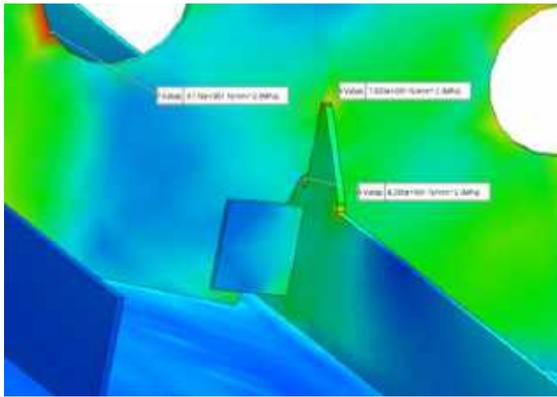


Рис. 9. Места наибольших напряжений (случай 4)

6. Места «жестких точек» в районах соединения наклонных листов ВКЗ с флором (через обшивку и подкладную полосу) не выявляют чрезмерно высоких напряжений (69,5 МПа, см. рис.10).

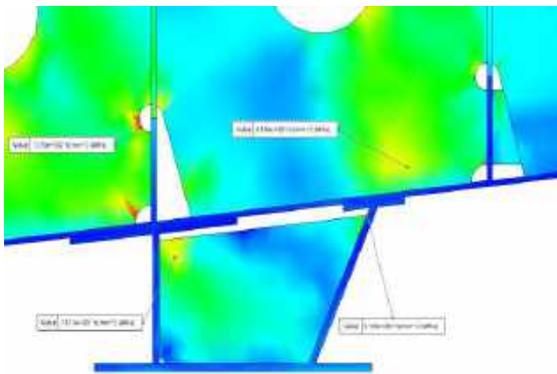


Рис. 10. Места наибольших напряжений (случай 5)

Выполненные исследования показали относительную эффективность возможных конструктивных решений для снижения уровня местных напряжений в районе размещения ВКЗ.

#### 4. Анализ несущей способности в области больших пластических деформаций

Для анализа поведения днищевого перекрытия с ВКЗ в области пластических деформаций использованы программы ANSYS и SolidWorks. Расчёты проведены в области перемещений, которые могут трактоваться как повреждения (остаточные прогибы), требующие ремонта.

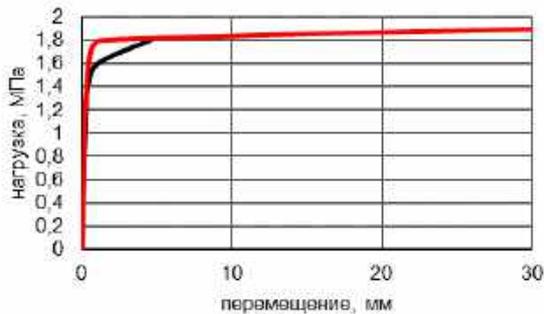


Рис. 11. График нагрузка-перемещение (— ANSYS — SolidWorks)

Программы показали разные оценки предельной прочности (рис. 11). SolidWorks дает заниженную

оценку предельной прочности и сохраняет работоспособность при сравнительно небольших прогибах. Результаты программы ANSYS можно считать предпочтительными, они отражают несущую способность при прогибах на порядок больше.

При построечных толщинах связей наибольшие напряжения выявляются во флоре. Уровень напряжений в вертикальной и наклонной полосе ВКЗ средний. Наименьшие напряжения в горизонтальной опорной полосе ВКЗ (рис.12). Представленная иерархия напряжений не является противоречивой. Как показано выше уровень местных напряжений во флорах может быть снижен соответствующими локальными конструктивными мерами. Опорная горизонтальная полоса работает в самых жестких условиях прямого контакта с грунтом. В результате следует ожидать и её ускоренный коррозионный износ. Для иллюстрации влияния её износа на рис. 12 даны сразу 3 кривые, соответствующие износу опорной полосы на 0, 20 и 40%.

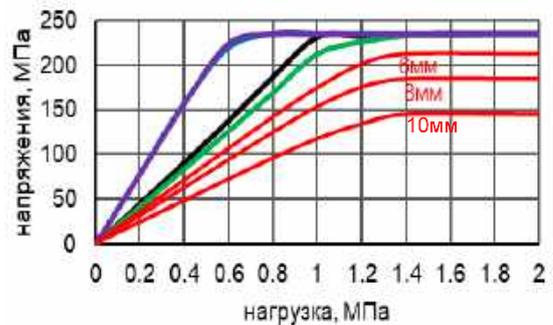


Рис. 12. График напряжения-нагрузки в элементах конструкции (— опорная, — вертикальная, — наклонная, — бракета, — флор)

Влияние износа и падение прочности особенно существенно для опорной полосы, работающей преимущественно на изгиб. С увеличением возраста ВКЗ и ростом износа напряжения в ней нарастают и приближаются к уровню для других конструктивных элементов.

Исследования несущей способности конструкций с ВКЗ и учетом износа представляют особую важность в задачах рационального проектирования и выбора размеров элементов при реализации конструктивных решений для защиты от грунта как новых судов, так и находящихся в эксплуатации.

#### Заключение

Широкие возможности, предоставляемые МКЭ для проверки принимаемых конструктивных решений, не исключают актуальности разработки аналитических алгоритмов для методик проектирования ВКЗ. Расчетная схема для использованного при анализе типа поперечного сечения ВКЗ показана на рис. 13.

Представленная схема защиты корпуса от грунта включает совокупность параметров, требующих определения и выбора оптимального решения. Решение таких задач планируется в дальнейших исследованиях.

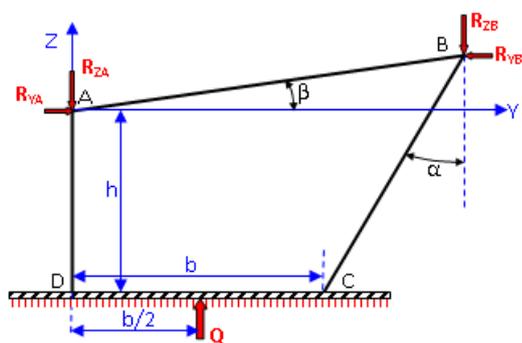


Рис. 13. Расчетная схема сечения ВКЗ

На данном этапе результаты работы показали принципиальную возможность эффективного типа

ВКЗ, взаимодействующей со связями корпуса при уровне напряжений ниже допустимых. Показана важная роль размещения ВКЗ и учета влияния противодействий грузов. Выявлены эффективные конструктивные меры по снижению напряжений в узлах и связях днища. Показаны особенности влияния износов на уровень напряжений и несущую способность.

Дополнительный вес ВКЗ при её протяженности до половины длины судна имеет порядок 1% от веса судна порожнем. При этом существенно повышается прочность и долговечность корпуса, снижаются затраты на ремонт в эксплуатации. Для судов с килеватостью днища резко увеличивается ширина опорной части и повышается устойчивость положения судна на грунте в процессе выполнения грузовых операций.

### Литература

1. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. РМРС. Ч. 17, раздел 15. Требование к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт (суда NAABSA). СПб., 2020. С. 258–269.
2. 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.
3. Фам Чунг Хиеп. Проектирование конструктивной защиты днища судов от грунта. (рук. В.А. Кулеш). Региональная научно – практическая конференция «Молодежь и научно-технический прогресс» МНТП - 2021. Владивосток: Изд-во ФГАОУ ВПО «ДФУ», 2021. С. 418–422.
4. Бураковский П.Е. Разработка конструктивной днищевой защиты для снижения последствий от посадок судов на мель. Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2014. № 2. С. 14–21.
5. Патент № 2463198 Российская Федерация, МПК7 В63В 3/24. Днищевое перекрытие судна. Бураковский П. Е. № 2011117730/11; заявл. 03.05.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28. 9 с.
6. Патент № 2559062 Российская Федерация, МПК В63В 3/22. Днищевое перекрытие судна: № 2014134652/11; заявл. 25.08.2014; опубл. 10.08.2015. Аносов А. П., Исаков А. А., Шаринкова О.С., Шмелев А. М.; заявитель ДВФУ. 7 с.
7. Патент № 206373 Российская Федерация, МПК В63В 2/24, В63В 3/14. Устройство для защиты днища судна при его посадке на грунт: № 2021114350; заявл. 21.05.2021; опубл. 08.09.2021. Кулеш В.А., Суров О.Э., Хиеп Чунг Фам; заявитель ДВФУ. 2 с.
8. Патент № 206393 Российская Федерация, МПК В63В 2/24, В63В 3/14. Устройство для защиты днища судна при его посадке на грунт: № 2021114349; заявл. 21.05.2021; опубл. 08.09.2021. Кулеш В.А., Суров О.Э., Хиеп Чунг Фам; заявитель ДВФУ. 2 с.
9. Кулеш В.А., Герман А.П., Фам Чунг Хиеп. Разработка схем усиления судна для взаимодействия с грунтом. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12. № 5. С. 915–925.

### References

1. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. RMRS. Ch. 17, razdel 15. Trebovanie k sudam, ekspluatatsiya kotorykh predusmatrivaet posadku na grunt (suda NAABSA). SPb., 2020. S. 258–269.
2. 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.
3. Pham Trung Hiep. Proektirovanie konstruktivnoy zashchity dnishcha sudov ot grunta [Designing of structural protection of the bottom of ships from ground]. (ruk. V.A. Kulesh). Regional'naya nauchno – prakticheskaya konferenciya «Molodezh' i nauchno-tekhnicheskij progress» MNTP 2021. Vladivostok: Izd-vo FGAOU VPO «DVFU», 2021. S. 418–422.
4. Burakovskij P.E. Razrabotka konstruktivnoy dnishchevoj zashchity dlya snizheniya posledstvij ot posadok sudov na mel' [Development of a constructive bottom protection to reduce the impacts of grouting]. Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2014. № 2. S. 14–21.
5. Patent № 2463198 Rossijskaya Federaciya, MPK7 B63B 3/24. Dnishchevoe perekrytie sudna. Burakovskij P. E. № 2011117730/11; zayavl. 03.05.2011; opubl. 10.10.2012, Byul. № 28. 9 s.
6. Patent № 2559062 Rossijskaya Federaciya, MPK V63V 3/22. Dnishchevoe perekrytie sudna: № 2014134652/11; zayavl. 25.08.2014; opubl. 10.08.2015. Anosov A. P., Isakov A. A., SHarinkova O.S., SHmelev A. M.; zayavitel' DVFU. 7 s.
7. Patent № 206373 Rossijskaya Federaciya, MPK V63V 2/24, V63V 3/14. Ustrojstvo dlya zashchity dnishcha sudna pri ego posadke na grunt: № 2021114350; zayavl. 21.05.2021; opubl. 08.09.2021. Kulesh V.A., Surov O.E., Hiep CHung Fam; zayavitel' DVFU. 2 s.

8. Patent № 206393 Rossijskaya Federaciya, MPK V63V 2/24, V63V 3/14. Ustrojstvo dlya zashchity dnishcha sudna pri ego posadke na grunt: № 2021114349; zayavl. 21.05.2021; opubl. 08.09.2021. Kulesh V.A., Surov O.E., Hiep CHung Fam; zayavitel' DVFU. 2 s.
9. German A.P. Razrabotka skhem usileniya sudna dlya vzaimodeystviya s gruntom [Development of the vessel strengthening schemes for ground contact]. A.P. German, V.A. Kulesh, Pham Trung Hiep. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2020. T. 12. № 5. S. 915-925.

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

**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

**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

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.10.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 05.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 09.08.2022.

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

Научная статья

УДК 629.5.031

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.005>

### Исследование влияния параметров рулевой системы на характеристики управляемости волнового глайдера

К.Д. Овчинников<sup>1</sup> ovchinnikov\_kd@mail.ru, А.А. Сенишин<sup>1</sup> andrey24-95@mail.ru,

А.Б. Белая<sup>1</sup> aljonabelaja@gmail.com, В.А. Рыжов<sup>1</sup> ryzhov@smtu.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В работе представлены некоторые результаты экспериментальных исследований характеристик управляемости волнового глайдера. Для исследований была построена модель волнового глайдера. На подводном модуле модели установлено четыре пары крыльев. Подводный модуль соединен с надводным модулем посредством двух кабель-тросов, расположенных в носовой и кормовой оконечностях аппарата. Модель оборудована системой радиоуправления. Было исследовано три принципиальных варианта исполнения рулевой системы: 1. Рулевая система включает в себя по одному рулю на надводном и подводном модулях (суммарно два руля управления); 2. Рулевая система включает в себя только руль на надводном модуле; 3. Рулевая система включает в себя только руль на подводном модуле. Испытания проводились в опытовом бассейне ФГБОУ ВО СПбГМТУ. Для испытаний было изготовлено три варианта рулей, отличающихся по размерам. Наилучшие показатели управляемости показал первый вариант исполнения рулевой системы (с двумя рулями управления). Диаметр установившейся циркуляции не превышал 4,5 длин корпуса. При управлении одним из рулей параметры циркуляции были в лучшем случае в два раза хуже, чем при управлении двумя рулями. При управлении одним рулем предпочтительной является схема с расположением руля на надводном модуле, так как в этом случае обеспечиваются более стабильные и хорошие показатели управляемости.

**Ключевые слова:** волновой глайдер, управляемость, руль, опытовый бассейн, машущее крыло.

**Для цитирования:** Овчинников К.Д., Сенишин А.А., Белая А.Б., Рыжов В.А. Исследование влияния параметров рулевой системы на характеристики управляемости волнового глайдера. 2022. № 3 часть 1, С. 44—49.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.005>

### Research of rudder system parameters influence to wave glider maneuverability

Kirill D. Ovchinnikov<sup>1</sup> ovchinnikov\_kd@mail.ru, Andrey A. Sinishin<sup>1</sup> andrey24-95@mail.ru,

Alena B. Belaya<sup>1</sup> aljonabelaja@gmail.com, Vladimir A. Ryzhov<sup>1</sup> ryzhov@smtu.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** The paper presents some results of experimental studies of the wave glider maneuverability. Wave glider model uses for research. Four pairs of foils install on the underwater module of the model. The underwater module connects with the surface module by two cables located in the bow and stern ends of the wave glider. The model is equipped with a radio control system. Three principal version of the rudder system investigate: 1. The rudder system includes by one rudder each on the surface and underwater modules (summary two active rudder); 2. The rudder system includes only the active rudder on the surface module; 3. The rudder system includes only the active rudder on the underwater module. The tests carry out in the St. Petersburg State Marine University towing tank. Three differ by size rudders are made. The best maneuver performance shows by the first version of the rudder system (with two active rudders). The steady turning diameter does not exceed 4.5 hull lengths. For one rudder system the tactical diameters are at best two times worse than two rudders system. It is preferable to place the rudder on the surface module for one rudder system, because this version is more stable and good maneuver.

**Keywords:** wave glider, maneuverability, rudder, towing tank, flapping foil.

**For citation:** Kirill D. Ovchinnikov, Andrey A. Sinishin, Alena B. Belaya, Vladimir A. Ryzhov Research of rudder system parameters influence to wave glider maneuverability, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 44—49.

#### Введение

Волновой глайдер – это двухмодульный надводный безэкипажный аппарат повышенной автономности. Он состоит из двух основных модулей: надводного и подводного. Надводный модуль имеет корпус судовых обводов, в котором располагается

необходимое оборудование. Подводный модуль оснащен системой машущих крыльев и обеспечивает движение всего аппарата. Надводный и подводный модули обычно соединены гибкой связью – кабель-тросом.

Повышенная автономность волнового глайдера достигается благодаря использованию на подводном

модуле аппарата нетрадиционной пропульсивной установки – системы машущих крыльев. Вследствие морского волнения, приводящего надводный модуль в качку, подводный модуль совершает вертикальные колебания, которые приводят в движение свободно вращающуюся относительно собственных поперечных осей крыльевую систему. Крыльевая система, имеющая ограничители угла поворота, работая как машущее крыло, создает полезную тягу (рис. 1). Аппарат, не тратя бортовую электроэнергию для передвижения, многократно увеличивает свою автономность.



Рис. 1. Принцип движения волнового глайдера [1]

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ) активно занимается исследованиями волновых глайдеров для нужд отечественной промышленности и науки. В настоящей работе представлены некоторые результаты экспериментальных исследований модели волнового глайдера в части выбора оптимальных параметров рулевой системы.

Проведению экспериментальных испытаний предшествовали теоретические исследования, связанные с математическим и компьютерным моделированием пропульсивных характеристик волнового глайдера. Эти работы, в большой степени связанные с изучением гидродинамики систем типа машущее крыло (работающих как в режиме двигателя, так и в режиме устройства извлечения волновой энергии), проводятся в ФГБОУ ВО СПбГМТУ с конца 70-х годов прошлого века [2–5]. Базируясь на выполненных теоретических исследованиях по гидродинамике волнового глайдера [6–9], были определены проектные параметры исследуемого аппарата.

Следует отметить, что зарубежные исследователи также активно занимаются исследованиями волновых глайдеров, особенно в части математического моделирования движения, в том числе для анализа характеристик управляемости [10–14].

#### Теоретические основы управляемости волнового глайдера

Волновой глайдер является уникальным морским сооружением, так как состоит из двух взаимодополняющих друг друга модулей: надводного, обеспечивающего плавучесть и вместимость, и подводного, обеспечивающего требуемую скорость хода. Таким образом, подводный модуль можно интерпретировать как источник полезной тяги – двигатель. При этом подводный модуль соединен с надводным посредством гибкой связи – кабель-троса. То есть волновой глайдер можно представить как судно

заданных размеров с двигателем, закрепленным на судне с помощью гибкого соединения.

Если руль управления установлен на подводном модуле, то подводный модуль может быть интерпретирован как двигатель с изменяемым вектором тяги. В этом случае подводный модуль будет ведущим, а надводный модуль – ведомым. При этом подводному модулю придется преодолевать силы сопротивления и возмущающие силы, возникающие со стороны надводного модуля.

Если руль управления установлен на надводном модуле, то реализуется наиболее распространенная схема управления: отдельно двигатель и отдельно руль. Однако в случае с волновым глайдером есть серьезная отличительная особенность: двигатель закреплен с помощью гибкого соединения. Подводный модуль играет только роль двигателя, а эффективность управления аппаратом будет определяться способностью подводного модуля воспринимать углы поворота от надводного модуля, то есть жесткостью соединения надводного и подводного модулей.

В случае если подводный модуль соединен с надводным модулем посредством только одного кабель-троса, то жесткость соединения будет стремиться к нулю, даже при очень высоком натяжении троса, а значит предпочтительным и, вероятно, единственно возможным вариантом исполнения рулевой системы будет расположение руля управления на подводном модуле.

Если подводный модуль соединен с надводным модулем посредством нескольких кабель-тросов, то возможно размещение руля управления как на подводном модуле, так и на надводном модуле. Эффективность системы управления будет зависеть от параметров рулей и жесткости соединения, то есть степени натяжения кабель-тросов и их расположения.

#### Модель волнового глайдера

Исследуемая модель волнового глайдера обладает следующими особенностями, принципиально отличающими её от известных зарубежных и отечественных прототипов:

- На подводном модуле установлено четыре пары крыльев (вместо «классических» шести пар),
- Подводный модуль соединен с надводным посредством двух кабель-тросов, расположенных в носовой и кормовой оконечностях аппарата (вместо одного кабель-троса, расположенного в центре тяжести надводного модуля).

Главные размерения модели составляют:

- Длина x Ширина x Высота (без стабилизатора) надводного модуля – 1015 x 224 x 78 мм;
- Длина x Ширина x Высота (без стабилизаторов) подводного модуля – 770 x 565 x 80 мм;
- Количество x размах крыльев подводного модуля – 4 x 565 мм;
- Предельный угол перекладки крыльев –  $-20^{\circ}$ – $+25^{\circ}$  (отрицательное значение определяет ограничительное значение угла перекладки крыла при движении вверх, положительное – при движении вниз);
- Масса надводного модуля (без балласта) – 3,5 кг, подводного модуля (без балласта) – 3,4 кг (вес в воде – 1,3 кг);
- Водоизмещение – 8,0 кг;

- Количество x длина кабель-тросов – 2 x 1000 мм.

Для модели волнового глайдера была разработана система управления движением, основанная на принципе радиоуправления. Исполнительная часть системы представляет собой кормовые вертикальные гидродинамические рули, установленные на надводном и подводном модулях волнового глайдера.

На известных прототипах используется расположение руля управления только на подводном модуле. На надводном модуле при этом установлены кормовые стабилизаторы (скеги) – неуправляемые рули. Однако с точки зрения исследования (и возможного улучшения характеристик управляемости) принято решение оснастить рулевым приводом как руль надводного модуля, так и руль подводного модуля. При этом возможна блокировка руля, изменяя его функциональное назначение с руля управления на стабилизатор.

В соответствии с этим возможно три принципиальных варианта исполнения рулевой системы волнового глайдера:

1. Рулевая система включает в себя по одному рулю на надводном и подводном модулях;
2. Рулевая система включает в себя только руль на надводном модуле, на подводном модуле при этом располагается кормовой стабилизатор (заблокированный руль);
3. Рулевая система включает в себя только руль на подводном модуле, на надводном модуле при этом располагается кормовой стабилизатор (заблокированный руль).

Фотография модели волнового глайдера при испытаниях представлена на рис. 2.



Рис. 2. Модель волнового глайдера

#### Испытания модели волнового глайдера в опытном бассейне

Испытания модели проводились в режиме свободного плавания в опытном бассейне кафедры Теории корабля ФГБОУ ВО СПбГМТУ, который имеет длину 35,7 м, ширину 5,5 м и глубину 2,1 м.

Для реализации режима свободного плавания в опытном бассейне с помощью установленного волнопродуктора плунжерного типа создавалось двухмерной регулярное волнение длиной ~3,50 м и высотой ~0,10 м.

Для исследования были изготовлены три варианта рулей:

- «Малый» руль площадью 0,007 м<sup>2</sup>;
- «Средний» руль площадью 0,010 м<sup>2</sup>;
- «Большой» руль площадью 0,013 м<sup>2</sup>.

«Малый» и «средний» рули могли устанавливаться на подводный и надводный модули. «Большой» руль был предназначен только для установки на надводный модуль, так как для его перекладки требуется рулевая машина большой мощности.

Изначально опытовый бассейн не предназначался для проведения испытаний на управляемость моделей, а потому имеет недостаточно большую ширину. Несмотря на это, при управлении двумя рулями (надводного и подводного модуля одновременно) модель совершала полные циркуляции и маневр «восьмерка».

При управлении только одним рулем (либо надводного, либо подводного модуля) ширины бассейна было недостаточно. В этих случаях исследовались возможности входа в циркуляцию модели при стартовом положении лагом к волнению. При этом рассматривались маневры на наветренный и подветренный борта при четырех интерпретациях вариантов исполнения рулевой системы:

1. Вариант исполнения рулевой системы 2 – «средний» руль на надводном модуле и «малый» стабилизатор на подводном модуле;
2. Вариант исполнения рулевой системы 3 – «малый» руль управления на подводном модуле и «средний» стабилизатор на надводном модуле;
3. Вариант исполнения рулевой системы 3 – «средний» руль управления на подводном модуле и «средний» стабилизатор на надводном модуле;
4. Вариант исполнения рулевой системы 3 – «средний» руль на подводном модуле и «большой» стабилизатор на надводном модуле.

Вариант исполнения рулевой системы 3 исследован многократно в различных интерпретациях, так как, как было написано ранее, он является классическим на известных прототипах, в том числе зарубежных.

#### Испытания модели волнового глайдера в опытном бассейне

При управлении двумя рулями были получены результаты, которые в целом соответствуют классическим водоизмещающим судам:

- При установке двух «малых» рулей на надводный и подводный корпуса соответственно диаметр установившейся циркуляции равен 4-4,5 длинам корпуса надводного модуля;

- При установке двух «средних» рулей на надводный и подводный корпуса соответственно диаметр установившейся циркуляции равен 3,5-4 длинам корпуса.

При этом средняя скорость модели была ~0,35 м/с, что соответствует (и даже несколько превышает) значениям, полученным при скоростных испытаниях [9].

При управлении одним из рулей (варианты исполнения рулевой системы 2 и 3) параметры циркуляции были в лучшем случае в два раза хуже, чем при управлении двумя рулями.

Траектории движения модели инструментально не фиксировались, однако качественная оценка параметров управляемости выполнена на основании видеозаписей испытаний (рис. 3 и 4). На рис. 3 и 4 приняты обозначения интерпретации рулевой

системы в соответствии с разделом 3 настоящей статьи.

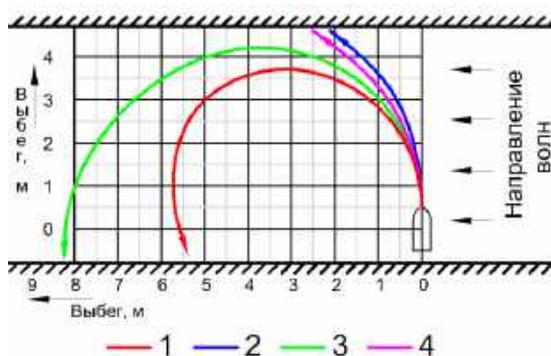


Рис. 3. Траектории движения при входе в циркуляцию на подветренный борт

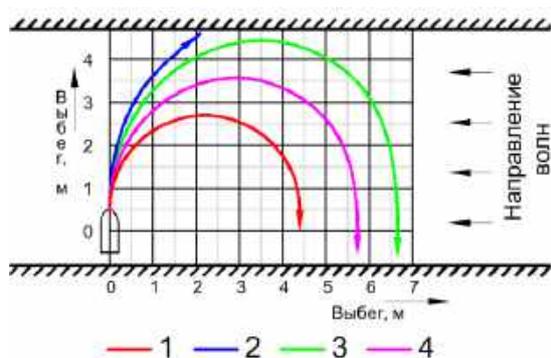


Рис. 4. Траектории движения при входе в циркуляцию на подветренный борт

Согласно данным, представленным на рис. 2 и 3, получено:

- При интерпретации рулевой системы 1 ожидаемый диаметр циркуляции равен ~5 длинам корпуса модели волнового глайдера;
- При интерпретации рулевой системы 3 ожидаемый тактический диаметр циркуляции равен ~7,5 длин корпуса;
- При интерпретациях рулевой системы 2 и 4 ожидаемый тактический диаметр циркуляции не может быть оценен.

#### Литература

1. <https://www.liquid-robotics.com/> (дата использования интернет-ресурса 01.09.2021 г.).
2. Рождественский К.В., Рыжов В.А. Математические модели в теории машущего крыла. – Л.: Изд. ЛКИ, 1985.
3. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. Aerohydrodynamics of Flapping Wing Propulsors // Progress in aerospace sciences. – 2003. – Vol. 39. – P.585-633.
4. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. Flapping-Wing Propulsion. McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology, 2005, McGraw-Hill.
5. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A., Tarasov S.V. LES Analysis of the MEMS Actuated Flapping Wing Biomimetic Propulsor // Proceedings of International Maritime Conference 22-24 June 2010 “MAST Americas 2010”, Washington DC, USA.
6. Кожемякин И.В., Потехин Ю.П., Рождественский К.В., Рыжов В.А. Волновой глайдер, как элемент морской глобальной информационно-измерительной системы // Матер. десятой научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог, Изд. ЮФУ, 2015. – С. 111-120.
7. Рождественский К.В. Оценка тяги и скорости волнового глайдера на основе упрощенной математической модели // Морской вестник. – 2016. – № 3 (59). – С. 95-98.
8. Рождественский К.В. Математическая модель машущего крыла для задач моделирования судов, движимых энергией волн // Морские Интеллектуальные Технологии. № 1 (43) Т.1 2019. С. 46-51.
9. К.Д. Овчинников, Ю.П. Потехин, В.А. Рыжов Экспериментальное исследование характеристик модели волнового глайдера. Морской Вестник, № 4 (76) декабрь 2020, стр. 33–35.

На основании полученных данных сделаны следующие выводы:

- Управление рулем, расположенным на надводном модуле, дает наилучшие параметры циркуляции как при входе на наветренный, так и при входе на подветренный борт;
- При управлении рулем, расположенным на подводном модуле, площадь руля имеет большее значение: увеличение площади руля в полтора раза позволило уменьшить тактический диаметр циркуляции до 7,5 длин корпуса (обеспечив поворот на 180° в пределах опытового бассейна);
- При управлении рулем, расположенным на подводном модуле, площадь стабилизатора, расположенного на надводном модуле, играет важную роль: при увеличении площади параметры управляемости менялись нестационарно, улучшаясь при входе на наветренный борт и ухудшаясь при входе на подветренный.

Таким образом, можно заключить, что при выборе третьего варианта исполнения рулевой системы необходимо находить баланс между площадями и расположением руля, установленного на подводном модуле, и кормового стабилизатора, установленного на надводном модуле. При всех прочих, при выборе между вторым и третьим вариантами исполнения рулевой системы предпочтительным является второй вариант, то есть управление рулем, расположенным на надводном модуле.

#### Заключение

В работе получены следующие результаты:

1. При управлении двумя рулями, расположенными на надводном и подводном модулях соответственно, диаметр установившейся циркуляции не превышает 4,5 длин корпуса;
2. При управлении одним рулем предпочтительным является вариант с установкой руля управления на надводном модуле;
3. При использовании варианта рулевой системы с одним рулем, расположенным на подводном модуле, при проектировании необходимо находить баланс между площадями и расположением руля и кормового стабилизатора, установленного на надводном модуле.

10. Peng Wang, Xinliang Tian, Wenyue Lu, Zhihuan Hu, Yong Luo Dynamic modeling and simulations of the wave glider. *Applied Mathematical Modelling* 66 (2019) 77–96.
11. Chun-lin ZHOU, Bo-xing WANG, Hong-xiang ZHOU, Jing-lan LI, Rong XIONG Dynamic modeling of a wave glider. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering* 2017 18(9):1295-1304.
12. Xiuyuan Wang, Zongyu Chang, Zhongqiang Zheng, Jiakun Zhang, Zhanxia Feng and Guiqiao Lu Analysis and Selection of Deployment Methods for a Wave Glider System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020, 8, 529.
13. Zhongqiang Zheng, Zhenjiang Yu, Zongyu Chang, Xiujun Sun, Zhanxia Feng, Jiakun Zhang, Haoran Zhao The Analysis of Optimal Oscillation Angle of Fin in Propulsion Device of Wave Glider Based on Quasisteady Hydrodynamic Method. *Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference*. Sapporo, Japan, June 10-15, 2018.
14. Fen Liu, Haipeng Guan, Xiujun Sun and Hongqiang Sang Research on turning maneuverability of submerged glider of the wave glider. *Proc IMechE Part M: J Engineering for the Maritime Environment* 1–11. IMechE 2020.

#### References

1. <https://www.liquid-robotics.com/> (01.09.2021).
2. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. *Matematicheskie modeli v teorii mashushchego kryla [Mathematical models in flapping foil theory]*. Leningrad, Izd. LKI, 1985.
3. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. *Aerohydrodynamics of Flapping Wing Propulsors*. Progress in aerospace sciences. 2003. Vol. 39. P.585-633.
4. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. *Flapping-Wing Propulsion*. McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology, 2005, McGraw-Hill.
5. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A., Tarasov S.V. *LES Analysis of the MEMS Actuated Flapping Wing Biomimetic Propulsor*. *Proceedings of International Maritime Conference 22-24 June 2010 "MAST Americas 2010"*, Washington DC, USA.
6. Kozhemyakin I.V., Potekhin Yu.P., Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A. *Volnovoy glayder, kak element morskoy global'noy informatsionno-izmeritel'noy sistemy [Wave glider as element of marine global informational and measuring system]*. *Mater. desyatoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»*. Taganrog, Izd. YuFU, 2015. С. 111-120.
7. Rozhdestvensky K.V. *Otsenka tyagi i skorosti volnovogo glaydera na osnove uproschennoy matematicheskoy modeli [Estimation of thrust and speed of a wave glider based on a simplified mathematical model.]*. *Morskoy Vestnik*. 2016. № 3 (59). P. 95-98.
8. Rozhdestvensky K.V. *Mathematical modeling of a flapping foil for modeling of wave-powered ships*. *Marine Intellectual Technologies*. № 1 (43) V.1 2019. P. 46-51.
9. Ovchinnikov K.D., Potekhin Yu.P., Ryzhov V.A. *Ekspperimental'noe issledovanie kharakteristik modeli volnovogo glaydera [Experimental study of wave glider model characteristics]*. *Morskoy Vestnik*, № 4 (76) December 2020, p. 33–35.
10. Peng Wang, Xinliang Tian, Wenyue Lu, Zhihuan Hu, Yong Luo Dynamic modeling and simulations of the wave glider. *Applied Mathematical Modelling* 66 (2019) 77–96.
11. Chun-lin ZHOU, Bo-xing WANG, Hong-xiang ZHOU, Jing-lan LI, Rong XIONG Dynamic modeling of a wave glider. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering* 2017 18(9):1295-1304.
12. Xiuyuan Wang, Zongyu Chang, Zhongqiang Zheng, Jiakun Zhang, Zhanxia Feng and Guiqiao Lu Analysis and Selection of Deployment Methods for a Wave Glider System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020, 8, 529.
13. Zhongqiang Zheng, Zhenjiang Yu, Zongyu Chang, Xiujun Sun, Zhanxia Feng, Jiakun Zhang, Haoran Zhao The Analysis of Optimal Oscillation Angle of Fin in Propulsion Device of Wave Glider Based on Quasisteady Hydrodynamic Method. *Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference*. Sapporo, Japan, June 10-15, 2018.
14. Fen Liu, Haipeng Guan, Xiujun Sun and Hongqiang Sang Research on turning maneuverability of submerged glider of the wave glider. *Proc IMechE Part M: J Engineering for the Maritime Environment* 1–11. IMechE 2020.

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

**Кирилл Дмитриевич Овчинников**, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования судов, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: ovchinnikov\_kd@mail.ru

**Kirill D. Ovchinnikov**, Ph.D. (Eng), assistant professor of ship design department, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ovchinnikov\_kd@mail.ru

**Андрей Андреевич Сенишин**, аспирант кафедры прикладной математики и математического моделирования, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: andrey24-95@mail.ru

**Andrey A. Sinishin**, graduate student of applied mathematics and mathematical modeling department, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: andrey24-95@mail.ru

**Алена Борисовна Белая**, ассистент кафедры гидроаэромеханики и морской акустики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: aljonabelaja@gmail.com

**Владимир Александрович Рыжов**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: ryzhov@smtu.ru

**Alena B. Belaya**, assistant teacher of hydro- and aeromechanics and marine acoustics department, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: aljonabelaja@gmail.com

**Vladimir A. Ryzhov**, Dr. Sci. (Eng), professor, head of applied mathematics and mathematical modeling department, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ryzhov@smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 22.10.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.06.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 17.07.2022.

Научная статья

УДК 629.5.017.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.006>

## Расчетное исследование гидродинамических характеристик судового руля, расположенного за дейдвудом

А.С. Гасникова<sup>1</sup> [nasta.gasnikova@gmail.com](mailto:nasta.gasnikova@gmail.com), В.В. Макарова<sup>1</sup> [mvv-220294@mail.ru](mailto:mvv-220294@mail.ru),  
Ю.П. Потехин<sup>1</sup> [i.y.potekhins@yandex.ru](mailto:i.y.potekhins@yandex.ru)

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В работе рассматривается влияние кормового дейдвуда на гидродинамические характеристики расположенного за ним судового руля. Задача решается расчетным путем с использованием нелинейного метода тонкой несущей поверхности. В расчетах варьируется расстояние между дейдвудом и носовой кромкой руля. В рассматриваемом установившемся криволинейном движении угол дрейфа изменяется от 0 до 20 градусов, безразмерная угловая скорость – от 0 до 0,756. Расчеты выполнены для двух крыльев, имитирующих корпус судна, удлинением 0,045 и 0,06. Исследование показало наличие влияния дейдвуда на гидродинамические характеристики руля в пределах расстояния до одной хорды руля. Уровень влияния существенно зависит от угла дрейфа и угловой скорости движения судна. В целом, результаты исследования способствуют уточнению математической модели судовых рулей, навешенных на кормовой дейдвуд. Кроме указанного в работе получен также ряд сведений, представляющих интерес при изучении управляемости судов.

**Ключевые слова:** управляемость судна, руль за дейдвудом, гидродинамические характеристики руля, тонкая несущая поверхность, расстояние между рулем и кормовым дейдвудом.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность Семёну Исааковичу Гур-Мильнеру за предоставление расчетных данных.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 33-33-90018

**Для цитирования:** Гасникова А.С., Макарова В.В., Потехин Ю.П. Расчетное исследование гидродинамических характеристик судового руля, расположенного за дейдвудом, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 50—57.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.006>

## Computational study of hydrodynamic characteristics of the ship rudder located behind the deadwood

Anastasia S. Gasnikova<sup>1</sup> [nasta.gasnikova@gmail.com](mailto:nasta.gasnikova@gmail.com), Valentina V. Makarova<sup>1</sup> [mvv-220294@mail.ru](mailto:mvv-220294@mail.ru),  
Yuri P. Potekhin<sup>1</sup> [i.y.potekhins@yandex.ru](mailto:i.y.potekhins@yandex.ru)

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** The article considers the influence of the aft deadwood on the hydrodynamic characteristics of the ship's rudder located behind it. The problem is solved by calculation using the nonlinear thin bearing surface method. The distance between the deadwood and the forward edge of the rudder varies in the calculations. In the steady curvilinear motion under consideration, the drift angle varies from 0 to 20 degrees, the dimensionless angular velocity varies from 0 to 0.756. Calculations were made for two wings imitating the ship's hull with an aspect ratio of 0.045 and 0.06. The study showed the influence of deadwood on the hydrodynamic characteristics of the rudder within the distance to one rudder chord. The level of influence significantly depends on the drift angle and the angular velocity of the ship. In general, the results of the study contribute to the refinement of the mathematical model of the ship's rudders hung on the stern deadwood. In addition to the information indicated in the work, a number of information was also obtained that is of interest in studying the controllability of ships.

**Keywords:** controllability of the ship, deadwood rudder, hydrodynamic characteristics of the rudder, thin bearing surface, distance between rudder and aft deadwood.

**Acknowledgments:** the authors are grateful to Semyon I. Gur-Milner for providing the data

**Financial Support:** the work was supported by the Russian Science Foundation, Project N9 17-77-300

**For citation:** Anastasia S. Gasnikova, Valentina V. Makarova, Yuri P. Potekhin, Computational study of hydrodynamic characteristics of the ship rudder located behind the deadwood, Marine intellectual technologies 2022. № 3 part 1. P. 50—57.

### Введение

В управляемости судна существует целый ряд вопросов, на которые до настоящего времени не получено удовлетворительных ответов. Эти вопросы касаются, в том числе, и гидродинамических

характеристик (ГДХ) судов. Примером такого «белого пятна» может служить руль, навешенный на кормовой дейдвуд. Он включен в общую группу с рулями, установленными в диаметральной плоскости вне струи гребного винта [1 – 4].

Вместе с тем, при малых расстояниях от дейдвуда и в случае руля, навешенного на дейдвуд, возникает эффект вихревого взаимодействия с корпусом. Вихревая система руля индуцирует на корпусе поперечные скорости, создавая гидродинамическую нагрузку, увеличивающую суммарную поперечную управляющую силу. Это явление хорошо известно из теории закрылков и элеронов [5 – 8].

Однако в управляемости последний фактор не принято учитывать. Более того, сложившейся методики расчета гидродинамических характеристик судового руля, навешенного на дейдвуд судна, в настоящее время не существует. При этом в специальной литературе [1,3] имеются указания на особенности свойств такого рулевого устройства, выгодно отличающего его от иных случаев расположения рулей в кормовом подзоре судна.

Примечательные свойства руля, навешенного на дейдвуд судна, могут быть проиллюстрированы данными, приведенными в учебнике К.К. Федяевского и Г.В. Соболева [1]. На рис.1, заимствованном из [1], представлены результаты измерения боковой силы руля при угле перекадки 25° на прямом курсе и на установившейся

циркуляции для шести моделей кораблей ВМФ США. Как видно из графиков, у моделей, рули которых не попадают в струю винта (VI, V), наблюдается резкое уменьшение боковой силы руля при криволинейном движении. У моделей с рулями в струе винтов (II, III, IV) снижения боковой силы практически не наблюдается. Снижение боковой силы обусловлено возрастанием скоса потока, набегающего на руль и уменьшающего эффективный угол перекадки. Гребные винты отсекают скос потока на корпусе, оказывая спрямляющее действие, и при криволинейном движении несколько увеличивают скорость потока, набегающего на руль, что связано с ростом коэффициента нагрузки винта по упору из-за падения скорости на циркуляции.

Обращает на себя внимание кривая, соответствующая танкеру с рулем за дейдвудом (I). Как видно, ощутимого падения силы на руле при циркуляции не наблюдается. Зависимость коэффициента боковой силы этого руля от угловой скорости очень близка к таковой для рулей, установленных за гребными винтами. Этот факт вызывает большой интерес с точки зрения образования боковой силы руля за дейдвудом и его взаимодействия с корпусом.

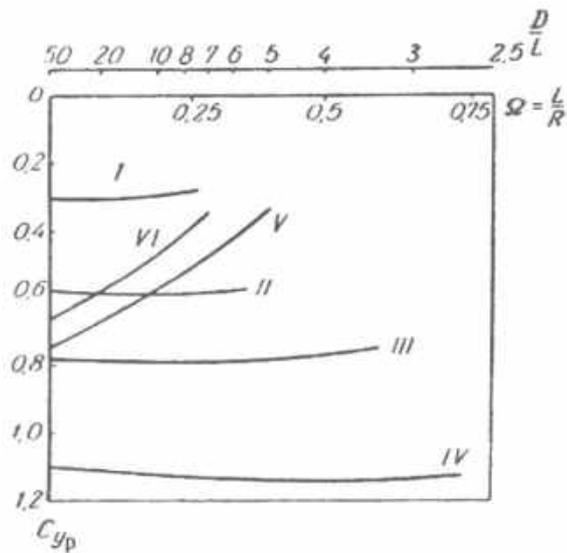


Рис.1. Зависимость коэффициента подъемной силы руля при угле перекадки 25° от относительного диаметра циркуляции для кораблей ВМФ США [1].

I – двухвальный танкер с рулем за дейдвудом; II – эсминец с двумя рулями за винтами; III – четырехвальный линкор с двумя рулями за винтами; IV – двухвальный тральщик с двумя рулями за винтами; V – четырехвальный крейсер с подвесным рулем в ДП; VI – двухвальный эсминец с подвесным рулем в ДП.

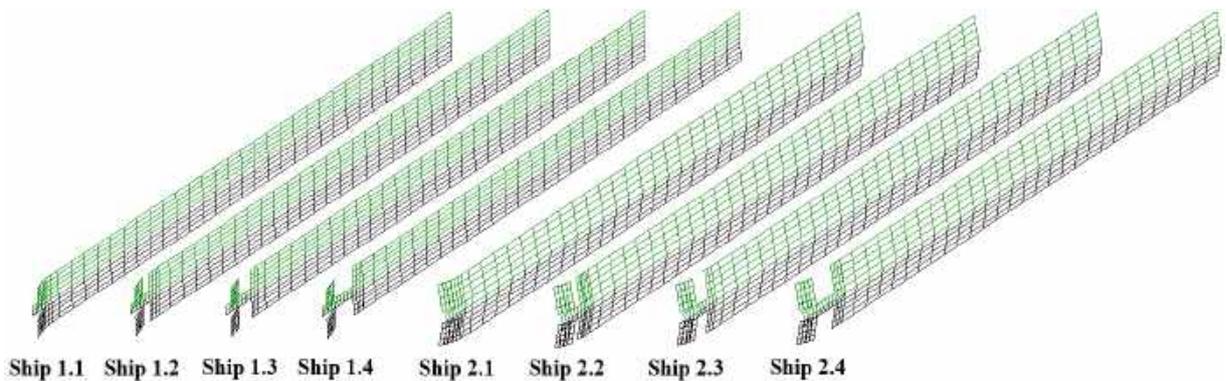


Рис. 2. Принятые для расчетов группы крыльевых систем.

К сожалению, ничего неизвестно о методике проведенного в США эксперимента. Можно лишь предполагать, что при фиксированном угле перекладки руля кривизна траектории обеспечивалась буксировкой на ротативной установке с имитацией работы движителей моделей. При этом остается открытым вопрос о том, как задавались на циркуляции углы дрейфа. Возможно, буксировка всех моделей, для определенности и сопоставимости, осуществлялась с нулевым углом дрейфа. Возможно, углы дрейфа задавались из опыта расчетов управляемости и эксплуатации рассмотренных в эксперименте объектов. Эти обстоятельства имеют существенное значение для толкования обсуждаемых результатов. В силу отсутствия указанной информации, целесообразно выполнить формализованное расчетное исследование гидродинамических характеристик судовых рулей, установленных в кормовом подзоре судна вне струи гребных винтов на различном расстоянии от кормового дейдвуда и, в частности, навешенных на него.

**Постановка и решение задачи**

Выполнение намеченного расчетного исследования было осуществлено, на базе нелинейной теории тонкой несущей поверхности [9,10].

Соответствующее программное обеспечение, разработанное на кафедре теории корабля СПбГМТУ, ранее было успешно использовано для расчетов ГДХ различных крыльевых систем. В качестве объекта исследования рассматривались 8 крыльевых систем, имитирующих корпус судна с рулем, расположенным в кормовом подзоре. Системы разделены на две группы, отличающиеся осадкой (т.е. удлинением крыльев  $\lambda$ ). В каждой группе заданы 4 расстояния от передней кромки пера руля до условного кормового дейдвуда ( $X_d$ ). Площади рулей ( $S_R$ ) и абсцисса баллера руля были приняты постоянными.

Крыльевые системы представлены на рис. 2 с переложенным рулем и отображенной выше ватерлинии подводной частью системы. Числа Фруда предполагаются малыми. Вторая группа крыльев представлена с углом крена на внешний борт циркуляции, который задавался для всех расчетных случаев движения с целью оценки его влияния на ГДХ рулей [12]. Заданный угол перекладки руля и отображение над границей раздела сред прямой или наклонной посадки реализуются программными средствами. Основные геометрические параметры крыльевых систем представлены в Таблице 1.

Таблица 1

**Геометрические характеристики расчетных крыльевых систем**

Расчётная система	Характеристики					
	$L_{вл}$ , м	$T$ , м	$\lambda$	$S_R$ , м <sup>2</sup>	$\lambda_P$	$X_d$ , м
Ship 1.1	40	1,8	0,045	1,728	1,2	0
Ship 1.2	40	1,8	0,045	1,728	1,2	0,6
Ship 1.3	40	1,8	0,045	1,728	1,2	1,2
Ship 1.4	40	1,8	0,045	1,728	1,2	1,8
Ship 2.1	40	2,4	0,06	2,304	1,6	0
Ship 2.2	40	2,4	0,06	2,304	1,6	0,6
Ship 2.3	40	2,4	0,06	2,304	1,6	1,2
Ship 2.4	40	2,4	0,06	2,304	1,6	1,8

В Таблице 1 обозначено:

- $L_{вл}$  – длина «корпуса» по ватерлинии;
- $T$  – осадка «корпуса» на миделе;
- $\lambda$  – относительное удлинение «корпуса»;
- $S_R$  – площадь руля;
- $\lambda_P$  – относительное удлинение руля;
- $X_d$  – зазор между кормовым дейдвудом и передней кромкой руля.

Для рассмотренных крыльев абсцисса центра давления пера руля во всех случаях принималась равной  $x_P = -19,4$  м. Безразмерная величина зазора между дейдвудом и рулем, отнесенная к хорде руля в каждой группе крыльев составляла 0; 0,5; 1,0; 1,5. Число Рейнольдса, приближенный учет которого обеспечивается в используемой программе, в расчетах имело величину около  $1,5 \cdot 10^8$ . Гидродинамические реакции рассчитывались в связанной системе координат, начало которой располагалось на миделе в плоскости ватерлинии. Ось  $x$  направлена в нос; ось  $y$  направлена на правый борт, перпендикулярно диаметрали; ось  $z$ , являясь следом пересечения плоскости миделя и диаметральной плоскости, направлена вверх;

Угол дрейфа в расчетах задавался значениями  $\beta = 0; 5; 10; 15; 20$  градусов. При этом угловая скорость

рыскания принималась равной  $\omega_z = 0; 2; 4; 6,5$  град/с, что при скорости хода  $v = 6$  м/с соответствует безразмерным значениям

$$\bar{\omega}_z = \frac{\omega_z \cdot L}{v} = 0; 0,233; 0,465; 0,756.$$

Ненулевой угол перекладки руля во всех случаях имел значение  $\delta = -25^\circ$ . Значение угла, близкого к предельному, обеспечивало ощутимую величину боковой силы на руле при всех сочетаниях кинематических параметров.

Для получения данных, сходных с [1], следовало, по-видимому, интегрировать гидродинамическую нагрузку, генерируемую на пере руля и в прилегающей к нему области корпуса. Однако при наличии угловой скорости в кормовой оконечности трудно указать протяженность области влияния

руля. Отсюда целесообразнее несколько изменить задачу и оценивать вклад руля по разности суммарных гидродинамических характеристик. В этих условиях из расчетов извлекается величина, равная

$$C_P \cdot \delta_{эф} = C_y^\delta \cdot \frac{S_P}{L \cdot T} \cdot \delta_{эф}, \quad (1)$$

где  $C_P$  – параметр, который Г.В. Соболев предложил называть эффективностью руля. Этот параметр связан с безразмерным коэффициентом подъемной силы руля, указанным на рис. 1, соотношением:

$$C_{yP} = C_P \cdot \frac{L \cdot T}{S_P} \cdot \delta_{эф},$$

где, как и ранее,  $S_P$  – площадь руля в  $m^2$ ;  $L, T$  – длина и осадка судна в м;  $\delta_{эф}$  – эффективный угол перекадки руля в радианах.

В дальнейшем под  $C_{yP}$  будем подразумевать величину, определяемую формулой (1).

Подробное исследование гидродинамических характеристик крыла малого размаха с закрылком, примыкающим к задней кромке крыла и

имитирующим судовую руль, выполнено в работе [11]. Авторами предложена соответствующая линейная аналитическая расчетная схема. Получены зависимости безразмерных производных поперечной силы и момента рыскания по углу перекадки руля. Приступая к намеченным расчетам, целесообразно сопоставить результаты, доставляемые выбранной программой с данными [11]. Такое сравнение возможно для крыла Ship\_2\_1, удлинение которого фигурирует в перечне расчетных результатов исследования [11]. Расчет соответствует нулевым значениям угла дрейфа и угловой скорости. С целью попадания в линейную область значений гидродинамических характеристик, угол перекадки руля системы Ship\_2\_1 был принят равным -10 градусов. Сравнение результатов вычислений представлено на графике рис. 3. Знаки величин соответствуют принятым в работе [11]. Полученное соотношение между непрерывным линейным и дискретным нелинейным решением можно признать вполне удовлетворительным.

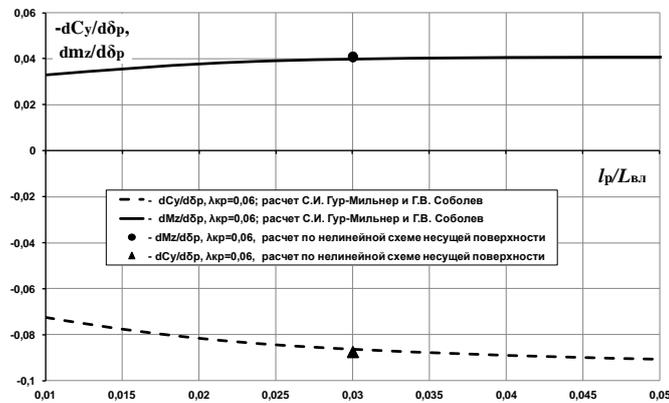


Рис. 3. Сопоставление расчетных результатов, доставляемых используемой программой и данными исследования [11].

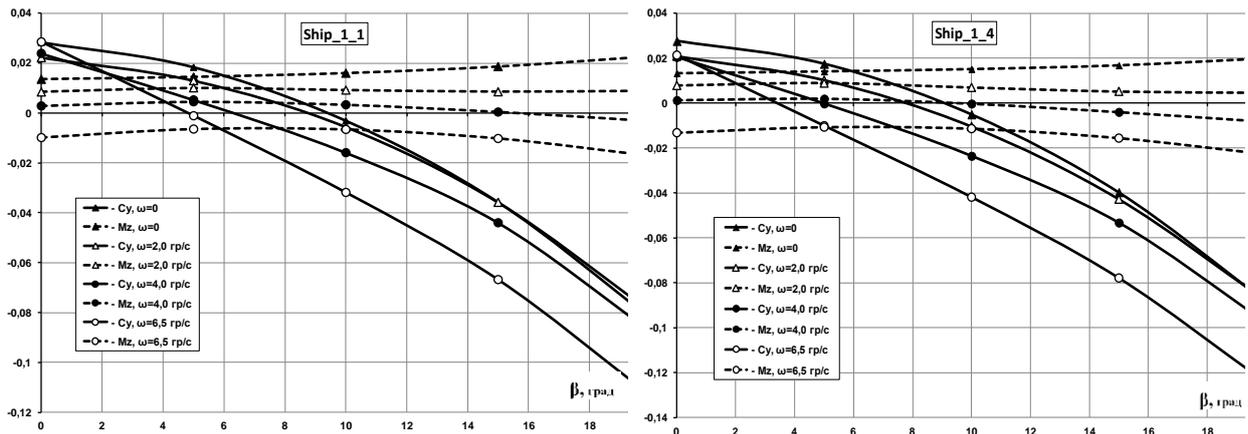


Рис. 4. Разность боковой силы и момента рыскания на крыльях Ship\_1\_1 и Ship\_1\_4 с переложным и отсутствующим рулем.

Для выделения из общей картины гидродинамических реакций составляющие, характеризующие руль в соответствии с формулой (1), необходимо из суммарных сил и моментов, возникающих при переложном руле вычлесть реакции, соответствующие «голому корпусу», т.е. имитирующему его крылу без руля. Однако такой

подход в принятой постановке задачи доставляет малоинформативный результат. На рис. 4 представлены данные для двух крыльев первой группы, полученные указанным образом. Как видно из графиков, боковая сила, формально соответствующая рулю, имея при малых углах дрейфа присущее ей положительное значение, с

увеличением угла натекания и угловой скорости становится отрицательной, значительно превышающей физические возможности руля.

Указанное обстоятельство обусловлено тем, что в кормовой оконечности плоского крыла, имитирующего корпус, реализуется полный угол скоса потока, определяемый кинематикой движения, чего не наблюдается на реальных телесных корпусах. В итоге эффективный угол перекладки руля быстро уменьшается и меняет знак.

Сопоставлять в этом случае эффективность рулей по условию расположения за дейдвудом затруднительно. В самом деле, на рис. 5 сопоставлены крылья Ship\_1\_1 и Ship\_1\_4 при угловой скорости 6,5 гр/с. При нулевом угле дрейфа сила на руле, навешенном на дейдвуд, на 33% больше, чем на руле, отстоящем от дейдвуда на 1,5 хорды. В то же время не совсем ясно, как интерпретировать соотношение сил на рулях при угле дрейфа 20°.

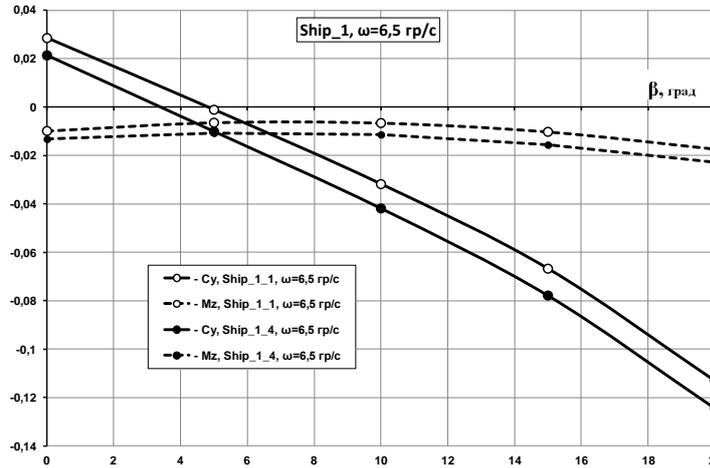


Рис. 5. Сопоставление данных по двум рулям, имеющим  $X_d = 0$  и  $X_d = 1,8$  м с учетом местного скоса потока.

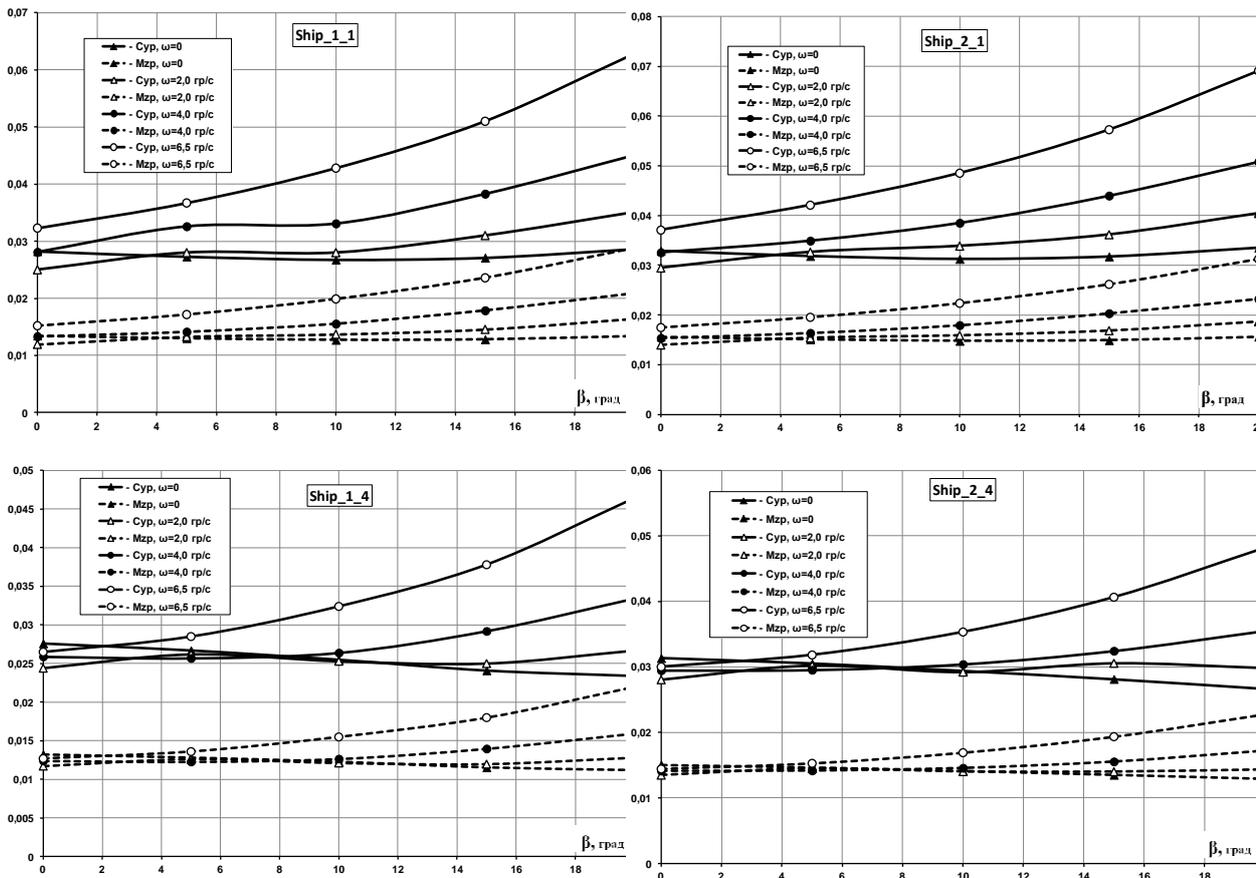


Рис. 6. Гидродинамические характеристики рулей для разных расстояний от дейдвуда, определенные без учета местного скоса потока.

По указанной причине, принимая во внимание некорректный учет местного скоса потока, целесообразно исключить его влияние на силу и момент, возникающие на руле. Нетрудно показать, что для этого гидродинамические реакции, возникающие в условиях действия руля, следует сопоставлять с таковыми при руле, закрепленном в ДП. Формально, в этом случае воздействие руля является функцией геометрического угла перекаладки. Влияние расстояния от дейдвуда будет определяться дополнительной гидродинамической

нагрузкой, генерируемой рулем на дейдвуде [7], и модулем местной скорости набегающего потока.

Результаты расчета гидродинамических характеристик рулей в рамках последних соображений представлены на рис. 6 для четырех крыльевых систем. Характер результатов полностью подтверждает высказанные предположения и позволяет однозначно судить о влиянии дейдвуда во всем принятом диапазоне изменения кинематических параметров.

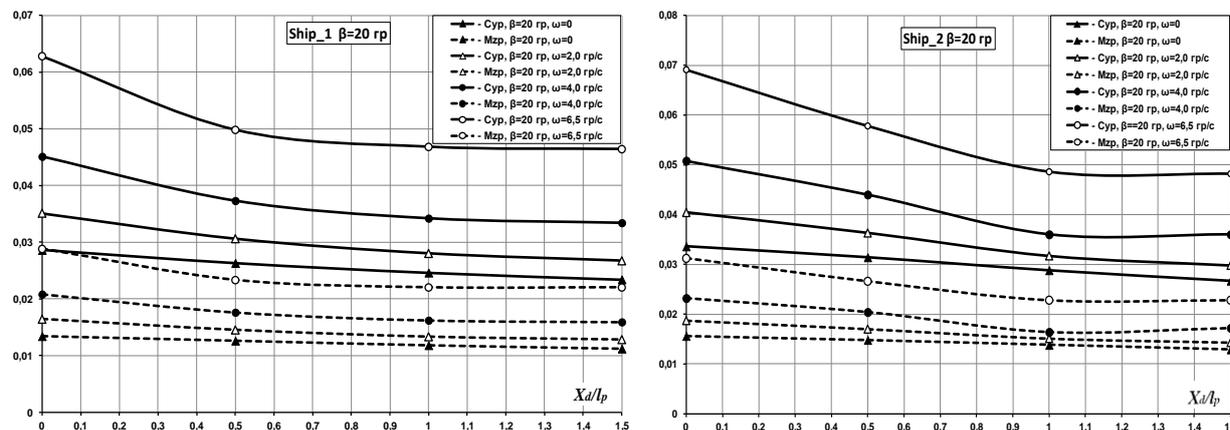


Рис. 7. Зависимость гидродинамических характеристик руля от расстояния до дейдвуда для систем Ship\_1 и Ship\_2 при угле дрейфа 20 градусов.

На рис. 7 приведены зависимости гидродинамических характеристик рулей от расстояния до дейдвуда при максимальном из обследованных угле дрейфа. Представленные графики показывают, что фактическое влияние дейдвуда ощутимо на расстоянии не более одной хорды руля. Влияние существенно возрастает при значительных угловых скоростях рыскания. В представленных результатах для системы Ship\_2 увеличение коэффициента боковой силы достигает 43%, а рост коэффициента момента составляет около 37%. Существенную роль в указанном возрастании играет, как уже отмечалось, модуль местной скорости набегающего потока.

Очевидно, что в реальных условиях воздействия скоса потока на эффективный угол перекаладки руля указанный уровень повышения эффективности руля не будет реализован. Тем не менее, можно ожидать увеличения гидродинамических характеристик руля на 15 – 20% при благоприятном стечении факторов.

### Заключение

Целью расчетного исследования являлась оценка гидродинамической эффективности рулей, установленных в кормовом подзоре судна вне диска гребных винтов на различном расстоянии от дейдвуда и, в частности, навешенных на его кормовую кромку. Указанная цель была достигнута систематическими расчетами гидродинамических характеристик крыльев предельно малого размаха, имитирующих судовые корпуса, оснащенные традиционными кормовыми рулями.

Результаты расчетов показали, что руль, навешенный на кормовую кромку дейдвуда, имеет повышенный коэффициент боковой силы, ощутимо возрастающий на траекториях большой кривизны..

Из результатов исследования вытекает, что удлинение крыла предельно малого размаха не влияет на качественную картину расчетных характеристик, вызывая ожидаемые количественные различия.

Выполненная в ходе расчетов оценка влияния угла крена на гидродинамические характеристики крыльевых систем предельно малого размаха показала незначительность этого влияния. С увеличением угла крена до 10-ти градусов наблюдается некоторое возрастание влияния с дальнейшим насыщением количественного эффекта.

Расчеты подтверждают применимость допущения о пренебрежении углом ветрового крена судна при оценке управляемости в условиях действия ветра.

Очевидно, что достоверность оценки влияния крена на гидродинамические характеристики ограничивается уровнем адекватности модели судового корпуса в форме плоского крыла предельно малого размаха.

Важным итогом исследования можно считать подтверждение применимости упрощенных гидродинамических моделей для оценки ряда существенных для практики эффектов, требующих систематизированных многовариантных расчетов.

### Литература

1. Федяевский К.К., Соболев Г.В. Управляемость корабля. Л.: ГСИСП, 1963 – 376 с.
2. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. Л.: Судостроение, 1976.
3. Гофман А.Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. – Л.: Судостроение, 1988 – 360 с.
4. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания/ Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985 – 544 с.
5. Соболев Г.В., Красницкий А.Д. О взаимодействии руля, рудерпоста и корпуса судна. – Труды НТО СП, вып.126, 1969, с. 65 – 74.
6. Красницкий А.Д., Соболев Г.В. Гидродинамическое взаимодействие руля с кронштейном или рудерпостом// Сб. НТО им. Акад. А.Н. Крылова. 1978. Вып. 282. с. 36 – 45.
7. Басин М.А., Шадрин В.П. Гидродинамика крыла вблизи границы раздела сред. – Л.: Судостроение, 1980. – 304 с.
8. Федяевский К. К. Избранные труды. Л.: Судостроение, 1975 – 440 с.
9. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях. М.: Наука, 1985.
10. Гур-Мильнер С.И. О связи метода П-образных вихрей с интегральным уравнением несущей поверхности в нестационарном потоке. – Труды ЛКИ: Гидромеханика и теория корабля, 1978, с.
11. Гур-Мильнер С.И., Соболев Г.В. Об определении аэродинамических производных крыла малого удлинения с рулем. – Труды ЛКИ: Гидродинамика и теория корабля, 1980, с. 98 – 103.
12. Жаринов А.В., Фарберов Я.Ф. Экспериментальное исследование X – образных и ромбовидных крыльев. НТО Судпрома им. акад. А.Н. Крылова. Доклады к XVI НТК по теории корабля. Крыловские чтения. Вып. 73, Л. 1966, с. 266 – 274.

### References

1. Fedyevskij K.K., Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya [Controllability of the ship]. L.: GSISP, 1963 – 376 s.
2. Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizaciya sudovozhdeniya [Ship controllability and navigation automation]. L.: Sudostroenie, 1976.
3. Gofman A.D. Dvizhitel'no-rulevoj kompleks i manevrirovaniye sudna [Propulsion and steering complex and maneuvering of the vessel]. Spravochnik. – L.: Sudostroenie, 1988 – 360 s.
4. Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomah. Tom 3. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchih sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya [Controllability of displacement ships. Hydrodynamics of vessels with dynamic principles of maintenance]/ Pod red. YA.I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985 – 544 s.
5. Sobolev G.V., Krasnickij A.D. O vzaimodejstvii rulya, ruderposta i korpusa sudna [On the interaction of the rudder, rudder post and ship's hull]. – Truda NTO SP, vyp.126, 1969, s. 65 – 74.
6. Krasnickij A.D., Sobolev G.V. Gidrodinamicheskoe vzaimodejstvie rulya s kronshtejnom ili ruderpostom [Hydrodynamic interaction of the rudder with the bracket or rudder post] // Sb. NTO im. Akad. A.N. Krylova. 1978. Vyp. 282. s. 36 – 45.
7. Basin M.A., SHadrin V.P. Gidrodinamika kryla vblizi granicy razdela sred [Wing hydrodynamics near the interface environment]. – L.: Sudostroenie, 1980. – 304 s.
8. Fedyevskij K. K. Izbrannye Trudy [Selected writings]. L.: Sudostroenie, 1975 – 440 s.
9. Belocerkovskij S.M., Lifanov I.K. CHislennye metody v singulyarnyh integral'nyh uravneniyah [Numerical methods in singular integral equations]. M.: Nauka, 1985.
10. Gur-Mil'ner S.I. O svyazi metoda P-obraznyh vihrej s integral'nym uravneniem nesushchej poverhnosti v nestacionarnom potoke [On the connection of the U-shaped vortex method with the integral equation of the bearing surface in a nonstationary flow]. – Trudy LKI: Gidromekhanika i teoriya korablya, 1978, s.
11. Gur-Mil'ner S.I., Sobolev G.V. Ob opredelenii aerodinamicheskikh proizvodnyh kryla malogo udlineniya s rulem [On the determination of aerodynamic derivatives of a small aspect ratio wing with a rudder]. – Trudy LKI: Gidrodinamika i teoriya korablya, 1980, s. 98 – 103.
12. ZHarinov A.V., Farberov YA.F. Eksperimental'noe issledovanie X – obraznyh i rombovidnyh kryl'ev [Experimental study of X-shaped and diamond-shaped wings]. NTO Sudproma im. akad. A.N. Krylova. Doklady k XVI NTK po teorii korablya. Krylovskie chteniya. Vyp. 73, L. 1966, s. 266 – 274.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Анастасия Сергеевна Гасникова** магистр техники и технологии, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 10, e-mail: nasta.gasnikova@gmail.com

**Anastasia S. Gasnikova** master of Engineering and Technology, Saint Petersburg State Marine Technical University, 190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya Street, 10, e-mail: nasta.gasnikova@gmail.com

**Валентина Вячеславовна Макарова** ассистент кафедры теории корабля, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: mvv-220294@mail.ru

**Valentina V. Makarova** postgraduate student of the Department of Ship Theory, Saint Petersburg State Marine Technical University, 190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya Street, 10, e-mail: mvv-220294@mail.ru

**Юрий Павлович Потехин** кандидат технических наук, доцент кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru

**Yuri P. Potekhin** Ph.D. (Eng), associate Professor of the Department of Ship Theory, Saint Petersburg State Marine Technical University, 190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya Street, 10, e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.02.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.06.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 23.07.2022.

Научная статья

УДК 629.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.007>

## Оценка мореходности судна на встречном нерегулярном волнении

Р.В. Борисов<sup>1</sup> rv2borisov@mail.ru, А.А. Лузянин<sup>1</sup> luzianin52@mail.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** Настоящая статья является шестой заключительной из цикла статей, посвященных корректировке кодекса ИМО по остойчивости в части ограничений продольной качки. В ней рассмотрена оценка мореходности транспортных судов в соответствии с ограничениями по погоде из условий, возникающих при продольной качке и предложены критерии оценки этих явлений на нерегулярном волнении разной интенсивности. На основании выполненных систематических расчетов продольной качки на нерегулярном волнении получены зависимости ограничений скорости хода транспортных судов в зависимости от предельных показателей мореходности: вертикальных ускорений, слеминга, заливаемости, амплитуд килевой качки. Полученные зависимости позволяют оценить мореходность. При этом ставится цель расширения нормативной базы для обоснованного назначения эксплуатационных ограничений по погоде и району плавания судов при совершенствовании Правил Российского Морского Регистра Судоходства на основе общего подхода к нормированию мореходности, согласующегося с методикой разработки новой Международной конвенции о грузовой марке 2000. Предлагаемый подход к определению критериев мореходности для оценки эксплуатационных ограничений судов по погоде из условий мореходности может быть использован на практике для совершенствования нормативных требований Регистра.

**Ключевые слова:** критерии и показатели мореходности, продольная качка, нерегулярное волнение, интенсивность волнения, ограничения продольной качки, правила Морского Регистра судоходства РФ, амплитуды вертикальной качки, амплитуды килевой качки, дополнительное сопротивление на волнении, вертикальные ускорения.

**Для цитирования:** Борисов Р.В., Лузянин А.А. Оценка мореходности судна на встречном нерегулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 58—62.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.007>

## The safety of a ship swaying under the influence of irregular waves

Rudolf V. Borisov<sup>1</sup> rv2borisov@mail.ru, Aleksandr A. Luzyanin<sup>1</sup> luzianin52@mail.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

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

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

**For citation:** Rudolf V. Borisov, Aleksandr A. Luzyanin The safety of a ship swaying under the influence of irregular winds and waves, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 58—62.

### Введение

Мореходностью корабля называется его способность к безопасному плаванию в условиях морского волнения и ветра. Мореходность корабля определяются следующими его свойствами: плавностью и малостью размахов всех видов качки; умеренностью заливания и забрызгивания; безопасностью от опрокидывания (достаточным запасом статической и динамической остойчивости); достаточной общей и местной прочностью; способностью маневрировать в условиях ветра и волнения; способностью длительное время

сохранять заданный курс и скорость на волнении; герметичностью корпуса; общей приспособленностью корабля к плаванию и функционированию в штормовых условиях.

В основном параметры мореходности судов и кораблей определяют по следующим количественным характеристикам и качественным процессам:

– скорость корабля на волнении, которая определяется как увеличением буксировочного сопротивления и ухудшением пропульсивных характеристик корабля, так и вынужденным снижением скорости хода по различным условиям;

– параметры бортовой, килевой, вертикальной качки, и, в общем случае, других видов качки;  
 – кинематические характеристики (перемещения, скорости, ускорения) определенных точек корпуса обусловленные качкой;  
 – заливание и забрызгивание верхней палубы и надстроек, а также слеминг корабля (бортовой и днищевой);

Скорость корабля на волнении является одной из важнейших технических и эксплуатационных характеристик и всегда меньше, чем в тихую погоду, в силу следующих основных причин:

1) увеличение сопротивления движению судна и снижение эффективности действия двигателей и двигателей;

2) намеренного снижения скорости при возникновении опасных для корабля явлений: чрезмерных амплитуд и ускорений качки, ударов корпуса о волны, заливаемости.

Первые обстоятельства ведут к естественному (или автоматическому), третье – к так называемому вынужденному (намеренному) снижению скорости.

В данной, обобщающей, статье приведена сравнительная оценка мореходности «базового» судна и судна, отличающегося коэффициентом общей полноты  $\delta=0,65$ .

Основные характеристики «базового» судна: длина,  $L=137,5$  м; ширина,  $B=19,65$  м; осадка,  $T=7,85$  м; коэффициент полноты площади ватер-линии,  $\alpha=0,782$ ; коэффициент общей полноты,  $\delta=0,700$ .

**1. Оценка естественной потери скорости хода**

На рис. 1,2 приведены зависимости относительного сопротивления «базового» судна и судна с  $\delta=0,65$  на тихой воде и на волнении разной интенсивности

$$\frac{R}{G} = \frac{R_{TB}}{G} + \frac{R_{AW}}{G} \quad (1)$$

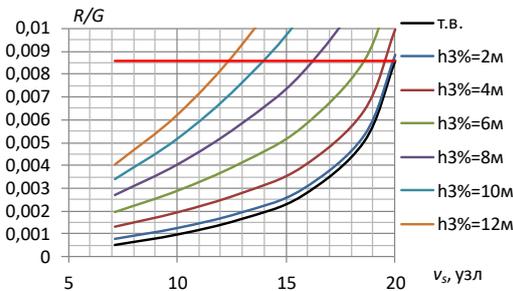


Рис. 1. Сопротивление «базового» судна ( $\delta=0,7$ ) на тихой воде и на волнении разной интенсивности.

Здесь  $R_{TB}$  – сопротивление на тихой воде, рассчитанное по серии универсальных среднескоростных судов [6],

$R_{AW}$  – дополнительное сопротивление на встречном нерегулярном волнении, определяемое согласно [1]:

$$\frac{R_{AW}}{G} = \kappa_R 0,25 (Fr^2 + 0,01) \left[ 1 - e^{-(11,9 h_{3\%}/L)^{(5Fr+1,27)}} \right], \quad (2)$$

$h_{3\%}$  – высота нерегулярных волн 3-х процентной обеспеченности,

$\kappa_R$  – поправочный коэффициент, зависящий от характеристик судна,

$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$  – относительная скорость.

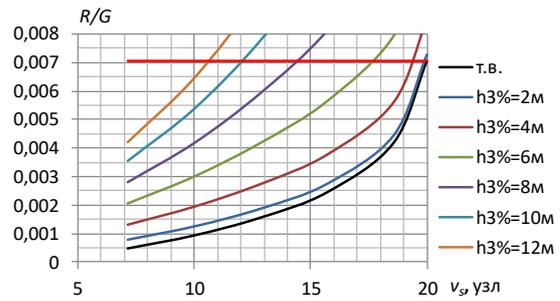


Рис. 2. Сопротивление судна ( $\delta=0,65$ ) на тихой воде и на волнении разной интенсивности.

На рис.3 даны кривые естественной потери скорости рассматриваемых судов на встречном нерегулярном волнении разной интенсивности, полученные при условии постоянной тяги равной сопротивлению судов на тихой воде при скорости 20 узлов.

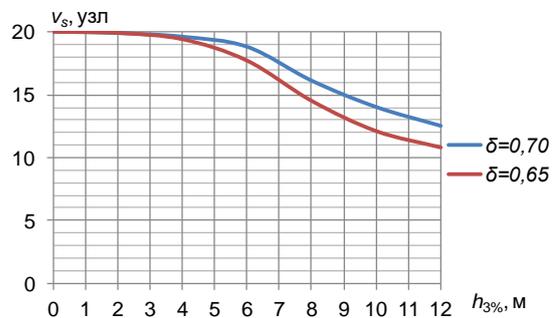


Рис. 3. Потеря скорости судов на волнении разной интенсивности.

Показатели мореходности можно оценить как отношение площади под кривой потери скорости к площади прямоугольника  $20 \times 12$ :

для «базового» судна с  $\delta=0,70$ :  $F_s=0,87$ , или 87%  
 для судна с  $\delta=0,65$ :  $F_s=0,83$ , или 83%

**2. Оценка вынужденной потери скорости из-за опасного слеминга**

На рис. 4,5 приведены кривые вероятности слеминга «базового» судна и судна с  $\delta=0,65$  на волнении разной интенсивности при различных скоростях хода, рассчитанные по зависимости [3]:

$$P_c = \kappa_p (290Fr^2 + 90Fr + 1) [1 - e^{-18(h_{3\%}/L - \kappa_{p1})^{2,4}}], \quad (3)$$

где  $\kappa_p, \kappa_{p1}$  – поправочные коэффициенты [3].

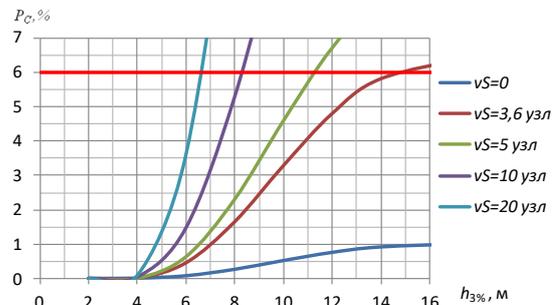


Рис. 4. Вероятность слеминга «базового» судна ( $\delta=0,7$ ) в зависимости от скорости и интенсивности волнения.

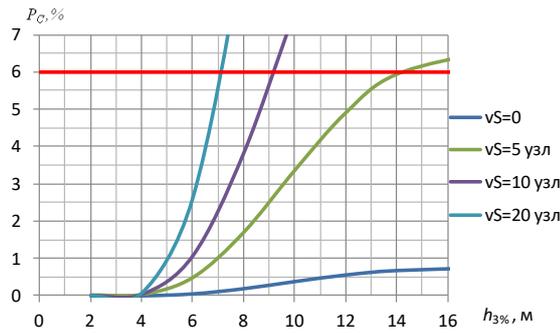


Рис.5. Вероятности слеминга судна ( $\delta=0,65$ ) в зависимости от скорости и интенсивности волнения.

На рис.6 даны кривые вынужденной потери скорости рассматриваемых судов на встречном нерегулярном волнении разной интенсивности, полученные при условии предельной вероятности слеминга 6%, на рис.4,5 сплошная красная линия.

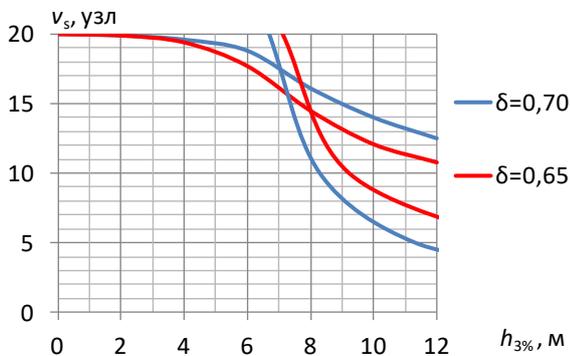


Рис.6. Снижение скорости рассматриваемых судов на волнении разной интенсивности из-за слеминга.

Показатели мореходности:  
 для «базового» судна с  $\delta=0,70$ :  $F_s=0,74$ , или 74%  
 для судна с  $\delta=0,65$ :  $F_s=0,77$ , или 77%

### 3. Оценка вынужденной потери скорости из-за опасной заливаемости на носовом перпендикуляре

На рис. 7,8 приведены кривые вероятности заливания на носовом перпендикуляре (НП) «базового» судна,  $\delta=0,70$ , и судна с  $\delta=0,65$  на волнении разной интенсивности при различных скоростях хода, рассчитанные по зависимости [4]:

$$\bar{q}_0 = \kappa_q [(1,4 + 2Fr)(1 - e^{-60h_{3\%}/L}) - 6\kappa_{q1}h_{3\%}/L] \quad (4)$$

где  $\kappa_q, \kappa_{q1}$  – поправочные коэффициенты [4].

Высота надводного борта на НП принята равной 1,5Т.

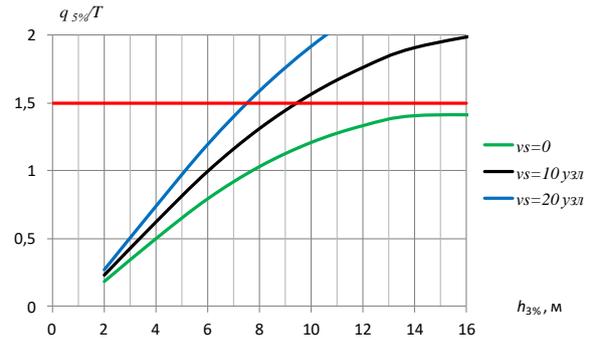


Рис.7. Вероятность заливаемости на НП «базового» судна А в зависимости от скорости.

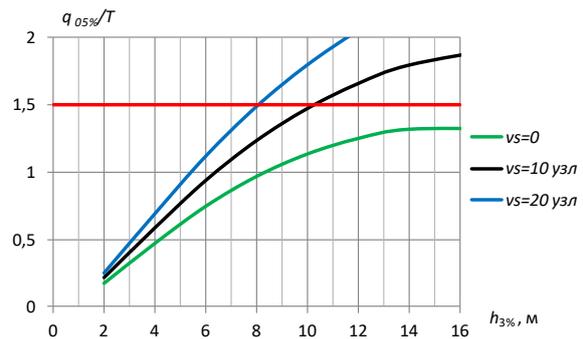


Рис.8. Вероятность заливаемости судна В в зависимости от скорости.

На рис.9 даны кривые вынужденной потери скорости рассматриваемых судов на встречном нерегулярном волнении разной интенсивности, полученные при условии предельной вероятности заливания, на рис.7,8 сплошная красная линия.

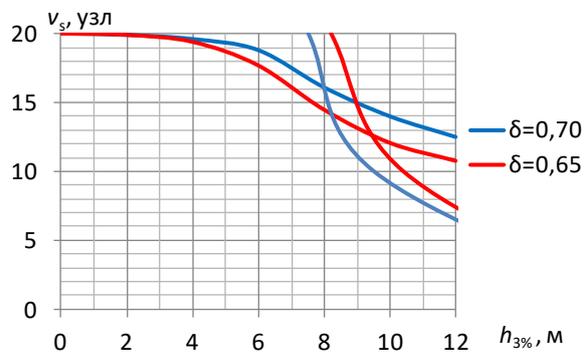


Рис.9. Снижение скорости рассматриваемых судов на волнении разной интенсивности из-за заливаемости.

Показатели мореходности:  
 для «базового» судна с  $\delta=0,70$ :  $F_s=0,80$ , или 80%  
 для судна с  $\delta=0,65$ :  $F_s=0,80$ , или 80%

**4. Оценка вынужденной потери скорости из-за опасных ускорений на носовом перпендикуляре**

На рис. 10,11 приведены кривые вертикальных ускорений на носовом перпендикуляре (НП) «базового» судна,  $\delta=0,70$ , и судна с  $\delta=0,65$  на волнении разной интенсивности при различных скоростях хода, рассчитанные по зависимости [4]:

$$\frac{a_{3\%}}{g} = \kappa_a 0,168(40,8Fr \frac{h_{3\%}}{L} + 4Fr + 1,03) \left[ 1 - e^{(-20,4 \frac{h_{3\%}}{L} + 0,1)} \right] \quad (5)$$

где  $\kappa_a$  – поправочный коэффициент [4].

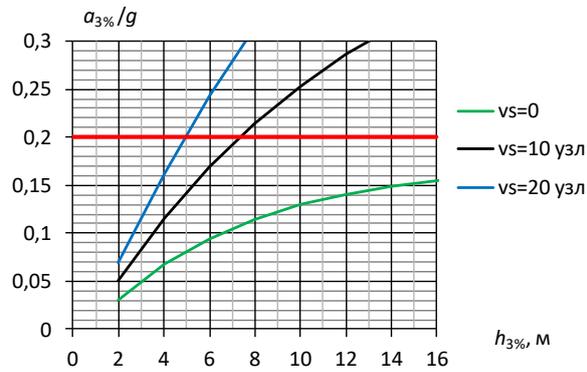


Рис. 10. Вертикальные ускорения на НП в зависимости от скорости.

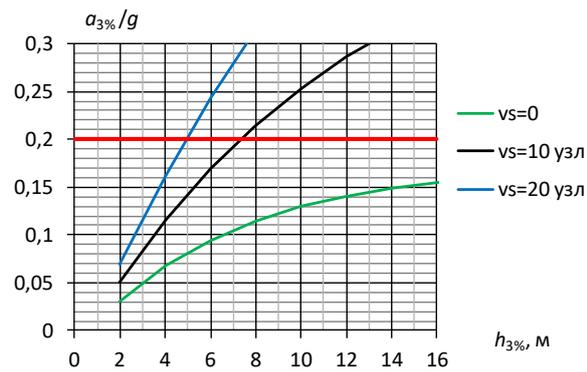


Рис. 10. Вертикальные ускорения на НП в зависимости от скорости.

На рис.11 даны кривые вынужденной потери скорости рассматриваемых судов на встречном нерегулярном волнении разной интенсивности, полученные при условии предельных ускорений,  $a_{3\%}/g = 0,2$ , на рис.9, 10 сплошная красная линия.

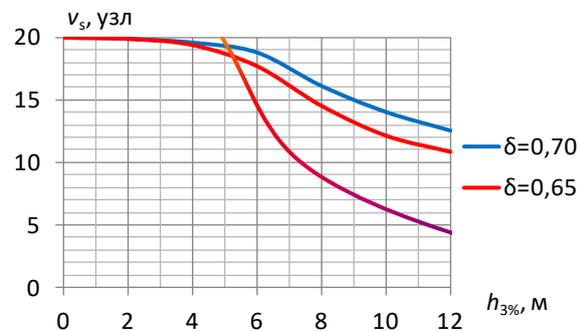


Рис. 11. Снижение скорости рассматриваемых судов на волнении разной интенсивности из-за ускорений.

Показатели мореходности:

для «базового» судна с  $\delta=0,70$ :  $F_s=0,69$ , или 69%  
для судна с  $\delta=0,65$ :  $F_s=0,68$ , или 68%

**5. Оценка вынужденной потери скорости из-за опасных амплитуд килевой качки.**

На рис. 10,11 приведены кривые вертикальных ускорений на носовом перпендикуляре (НП) «базового» судна,  $\delta=0,70$ , и судна с  $\delta=0,65$  на волнении разной интенсивности при различных скоростях хода, рассчитанные по зависимости [1]:

$$\psi_{3\%} = 110\kappa_\psi \left( 1 + 1,47Fr \right) \left[ \frac{h_{3\%}}{L} - 2,55 \left( \frac{h_{3\%}}{L} \right)^2 - 0,01 \right] \quad (5)$$

где  $\kappa_\psi$  – поправочный коэффициент [1].

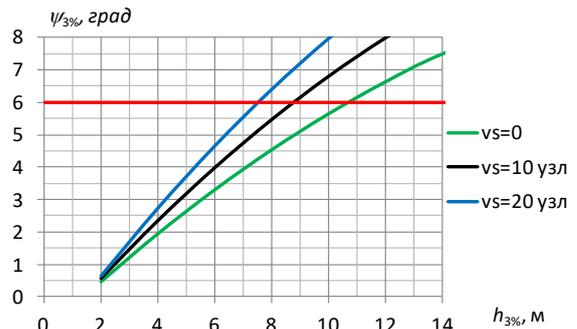


Рис. 12. Амплитуды килевой качки в зависимости от скорости и интенсивности волнения для судна  $\delta=0,70$ .

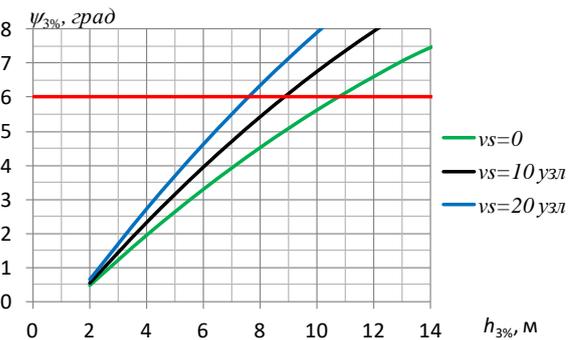


Рис. 12. Амплитуды килевой качки в зависимости от скорости и интенсивности волнения для судна  $\delta=0,65$ .

На рис.13 даны кривые вынужденной потери скорости рассматриваемых судов на встречном нерегулярном волнении разной интенсивности, полученные при условии предельных амплитуд качки  $\psi_{3\%} = 6^\circ$  на рис.11, 12 сплошная красная линия

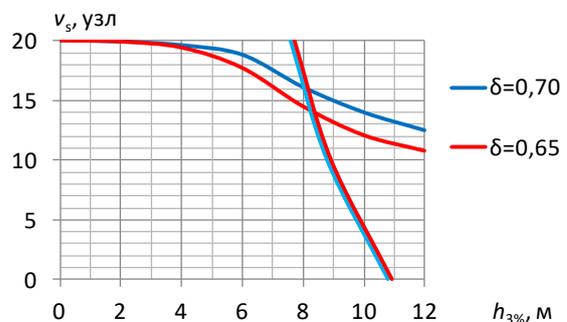


Рис. 13. Снижение скорости рассматриваемых судов на волнении разной интенсивности из-за чрезмерных амплитуд килевой качки.

Показатели мореходности:  
для «базового» судна с  $\delta=0,70$ :  $F_s=0,73$ , или 73%  
для судна с  $\delta=0,65$ :  $F_s=0,71$ , или 71%.

#### Заключение

Выполненные систематические расчеты и их анализ позволили получить приближенные зависимости для оценки показателей мореходности (потери скорости) транспортных судов на нерегулярном волнении разной интенсивности.

#### Литература

1. Басин А. М. Качка судов. М.: Транспорт. – 1969.
2. Благовещенский С. Н. Качка корабля Л.: Судпромгиз. – 1954.
3. Павленко Г. Е. Качка судов. Л.: Гострансиздат - 1935.
4. Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил РС с учетом корректировки кодекса ИМО по остойчивости в части ограничений продольной качки. Морские интеллектуальные технологии, №3 (45) Т. 2, 2019, с.65-69
5. Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил РС в части ограничений продольной качки. Морские интеллектуальные технологии, №3 (49) Т. 1, 2020, с.15-20
6. Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил РС в части ограничений слеминга и оголения винта. Морские интеллектуальные технологии, №2 (52) Т. 3, 2021, с.48-52
7. Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил регистра судоходства в части ограничения заливаемости. Морские интеллектуальные технологии, №3 (53) Т. 1, 2021, с.18-24
8. Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил Регистра Судоходства в части ограничения ускорений. Морские интеллектуальные технологии, №4 (54) Т. 2, 2021, с.15-20
9. Справочник по теории корабля (Под ред. Я.И. Войткунского). Т.1,2. Л.: Судостроение. 1985.
10. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Л., "Судостроение", 1982.

#### References

1. Basin A.M. Kachka sudov. M.: Transport. 1969.
2. Blagoveschenskij S.N. Kachka korablja. L.: 1954. Sudpromgiz. 1954.
3. Pavlenko G.E. Kachka sudov. L.: Gostfrnsizdat. 1935.
4. Borisov R.V., Luzianin A.A. O razrabotke proekta trebovaniy pravil RS s utschetom korrekcirovki kodeksa IMO po ostoytschivosti v tschasti ogranitscheniy prodolnoy katschki. Morskie intellektualnye tekhnologii, №3 (45) Т. 2, 2019, s.65-69
5. Borisov R.V., Luzianin A.A. O razrabotke proekta trebovaniy pravil RS v tschasti ogranitscheniy prodolnoy katschki. Morskie intellektualnye tekhnologii, №3 (49) Т. 1, 2020, s.15-20
6. Borisov R.V., Luzianin A.A. O razrabotke proekta trebovaniy pravil RS v tschasti ogranitscheniy sleminga i ogolenia vinta. Morskie intellektualnye tekhnologii, №2 (52) Т. 3, 2021, s.48-52
7. Borisov R.V., Luzianin A.A. O razrabotke proekta trebovaniy pravil registra sydohodstva v tschasti ogranitscheniy salivaemostia. Morskie intellektualnye tekhnologii, №3 (53) Т. 1, 2021, s.18-24
8. Borisov R.V., Luzianin A.A. On the development of the draft requirements for the rules of the Register of Shipping in terms of limiting accelerations. Morskie intellektualnye tekhnologii, №4 (54) Т. 2, 2021, s.15-20
9. Spravochnik po teorii korablya (Pod red. YA.I. Voitkunskogo). Т.1,2. L.: «Sudostroenie». 1985.
10. Borodai I.K., Necvetaev Y.A. Morehodnost sydov. L.: «Sudostroenie». 1982.

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 06.08.2022.

## Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.008>**Определение дополнительного сопротивления, возникающего при качке судна в различных стесненных фарватерах**В.Ю. Семенова<sup>1</sup> [sem\\_viktoria@mail.ru](mailto:sem_viktoria@mail.ru), Н.А. Павлючук<sup>1</sup> [raf.castro@yandex.ru](mailto:raf.castro@yandex.ru)<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В статье проводится определение дополнительного сопротивления, возникающего в случае качки судна на мелководье, качки судна параллельно вертикальной стенке на мелководье и при качке в канале. Определение дополнительного сопротивления осуществляется на основании определения продольной составляющей силы волнового дрейфа по методам, разработанным в предшествующих работах. Данные методы основаны на применении метода интегральных уравнений и зеркальных отображений для случая качки судна параллельно вертикальной стенке и в канале. Проведенное исследование в отечественной практике является новым. В статье приводятся результаты расчетов дополнительного сопротивления при качке различных типов судов на встречном регулярном волнении. Проводится исследование влияния различных факторов на их величины, а именно: изменения относительной глубины фарватера, изменения расстояния между судном и вертикальной стенкой, изменения относительной ширины канала. Показано значительное увеличение значений дополнительного сопротивления при уменьшении относительной глубины, уменьшении относительной ширины канала и расстояния между судном и стенкой. Приведено сравнение значений дополнительного сопротивления с результатами расчетов, выполненных по приближенным методам Иозена и Герритсмы. Показана невозможность применения приближенных методов при определении дополнительного сопротивления в канале.

**Ключевые слова:** метод интегральных уравнений, трехмерная потенциальная теория, дополнительное сопротивление, функция Грина, метод зеркальных отображений, качка в канале, мелководье.

**Для цитирования:** Семенова В.Ю., Павлючук Н.А., Определение дополнительного сопротивления, возникающего при качке судна в различных стесненных фарватерах, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 63—70.

**Original article**DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.008>**Determination of the additional resistance that occurs during the ship's motions in various confined waterways**Viktoriya Yu. Semenova<sup>1</sup> [sem\\_viktoria@mail.ru](mailto:sem_viktoria@mail.ru), Nikita A. Pavlyuchuk<sup>1</sup> [raf.castro@yandex.ru](mailto:raf.castro@yandex.ru)<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** The article defines the additional resistance that occurs in the case of ship's motions in shallow water, ship's motions parallel to the vertical wall in shallow water and during the motions in the channel. The additional resistance is determined based on the determination of the longitudinal component of the wave drift force according to the methods developed in previous works. These methods are based on the application of the method of integral equations and mirror images for cases of ship's motions parallel to the vertical wall and in the channel. The study carried out in domestic practice is new. The article presents the results of calculations of additional resistance arising during the motions of various types of ships in regular heading waves. A study is being made of the influence of various factors on their values, namely: changes in the relative depth of the fairway, changes in the distance between the ship and the vertical wall, changes in the relative width of the channel. A significant increase in the values of additional resistance with a decrease in the relative depth, a decrease in the relative width of the channel and the distance between the ship and the wall is shown. The values of the additional resistance are compared with the results of calculations performed using the approximate methods of Joosen and Gerritsma. The impossibility of using approximate methods in determining the additional resistance in the channel is shown.

**Keywords:** method of the integral equations, three-dimensional potential theory, additional resistance, Green's function, method of mirror images, motions of ship in the channel, shallow water.

**For citation:** Viktoriya Yu. Semenova, Nikita A. Pavlyuchuk, Determination of the additional resistance that occurs during the ship's motions in various confined waterways, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 63—70.

**Введение**

Основными причинами увеличения буксировочного сопротивления судна в условиях волнения являются дополнительное сопротивление воды движению судов вследствие продольной качки и воздействия дифрагированных и набегающих волн.

Для расчета дополнительного сопротивления существует много приближенных методов, основанных на учете только амплитуд вертикальной и килевой качки. К таким методам относится метод Хавелока, Маруо [9]. Маруо было доказано, что наибольшее влияние имеет килевая и вертикальная

качки, значения продольно – горизонтальной качки напротив малы и могут не включаться в расчет.

Позднее Йозен [8] используя теорию Маруо усовершенствовал её, путем расширения асимптотического ряда степеней для параметров «тонкого судна» и отсек ряд членов первого порядка. Таким образом, было получено следующее выражение для дополнительного сопротивления:

$$R_{AW} = \frac{1}{2} \frac{\omega_e^3}{g} [\mu_{33} \zeta_a^2 + \mu_{55} \psi_a^2 - 2\mu_{35} \zeta_a \psi_a \cos(\epsilon_\zeta - \epsilon_\psi)]. \quad (1)$$

где  $\omega_e$  – частота;  $\mu_{33}$  – коэффициент демпфирования вертикальной качки,  $\mu_{55}$  – коэффициент демпфирования килевой качки,  $\zeta_a$  – амплитуда вертикальной качки,  $\mu_{35}$  – коэффициент демпфирования при взаимодействии вертикальной и килевой качки,  $\psi_a$  – амплитуда килевой качки,  $\epsilon_\zeta$  – фаза вертикальной качки,  $\epsilon_\psi$  – фаза килевой качки. Как видно, выражение учитывает, как демпфирование, так и амплитуды качки судна.

Йозен пришел к выводу, что сила дрейфа в продольном направлении на встречном волнении зависит только от потенциала распространения волн и что дифракцией можно пренебречь, за исключением малых волн, где эффект оказывает наибольшее влияние.

В своей работе Герритсма и Бьюкельман вычисляли  $R_{AW}$ , используя гипотезу плоских сечений [6]. Исследователи определяли с помощью гипотезы среднюю энергию  $E^*$  радиации волн, вызванных продольной качкой судна. Таким образом,  $E^*$  является дополнительной работой, производимой силой  $R_{AW}$  на пути  $\lambda / \cos \beta_B$  за период  $\tau_k = 2\pi / \omega_k$ , то

$$R_{AW} = E^* \frac{\cos \beta_B \tau_k}{\lambda} = \frac{\cos \beta_B}{\lambda} \int_0^{\tau_k} \int_{-L/2}^{L/2} v_{33} v_z^2 dx dt, \quad (2)$$

где  $v_{33}$  – коэффициент демпфирования при вертикальных колебаниях сечений корпуса судна,  $H/M^2$ ;  $v_z$  – вертикальная составляющая относительной скорости сечений корпуса судна, м/с.

Здесь

$$v_z = v_{zA} e^{i\omega_k t}, \quad (3)$$

где

$$v_{zA} = \{v\psi_1 - \omega_k [\kappa_T \sin(k_0 x \cos \beta_B) - \zeta_{g2} - x\psi_2] + i\{v\psi_2 + \omega_k [\kappa_T \sin(k_0 x \cos \beta_B) - \zeta_{g1} - x1]\};$$

$\zeta_{g1}, \zeta_{g2}$  и  $\psi_1, \psi_2$  – вещественные и мнимые части комплексных амплитуд вертикальной и килевой качки, соответственно. Возможно, определить влияние скорости судна на величину  $v_{33}(x)$ , представляя

$$v_{33}(x) = \mu_{33}(x) - v \left[ \frac{d\lambda_{33}(x)}{dx} \right]. \quad (4)$$

Метод Герритсмы и Бьюкельмана, а также метод Беше дают хорошую оценку силы дополнительного сопротивления на взволнованной поверхности. Однако пик значений сопротивления несколько завышен при сравнении с экспериментальными данными. Методы не учитывают сопротивление, возникающее при рысканье и крене. Отдельным

вопросом является определение дополнительного сопротивления при движении судна параллельно вертикальной стенке и в канале. В этих случаях приближенные методы могут не работать и единственным методом определения дополнительного сопротивления является определение соответствующей продольной силы волнового дрейфа на основании трехмерной потенциальной теории.

В настоящей статье рассматривается определение дополнительного сопротивления при движении судна на встречном регулярном волнении в условиях мелководья, параллельно вертикальной стенке и в канале на основании трехмерной потенциальной теории и сравнение полученных результатов с вышеизложенными методами Йозена и Герритсмы.

### Описание метода

Продольная составляющая силы волнового дрейфа определяется одинаково для всех задач согласно следующему выражению [2], [3], [4], [5]:

$$\begin{aligned} \overline{F_1} = \int_c \left\{ -\frac{\rho g}{2} \overline{\zeta_r^2} \right\} n_1 ds - \omega_e^2 M \overline{\eta_3 \eta_5} + \\ \omega_e^2 M \overline{(\eta_2 - z_G \eta_4) \eta_6} + \rho \int_{S_B} \left\{ (\eta_2 + x \eta_6 - \right. \\ \left. z \eta_4) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial t} + U \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial x} \right) \Big|_m + (\eta_3 - x \eta_5 + \right. \\ \left. y \eta_4) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial t} + U \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial x} \right) \Big|_m + \left( \left( \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \right. \\ \left. \left. \left( \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right) \right\} n_1 ds \end{aligned} \quad (5)$$

Входящие в выражение (5) потенциалы определяются на основании работ [1-5] следующим образом. При движении на мелководье [1], [5]:

$$\phi^{(1)}(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma_i(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS, \quad (6)$$

где  $G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1)$  – функция Грина для пространственного пульсирующего источника, расположенного в точке с координатами  $(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$ .

На мелководье параллельно вертикальной стенке [2], [3], [10]:

$$\begin{aligned} \phi^{(1)}(\xi, \eta, \zeta) = \\ \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma_i(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) [G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) + \\ G_{Hq}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, 2H_q - \eta_1, \zeta_1)] dS, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $G_{Hq}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, 2H_q - \eta_1, \zeta_1)$  – функция Грина, полученная посредством метода зеркальных отображений

В канале [3], [10], [11], [12]:

$$\begin{aligned} \phi^{(1)}(\xi, \eta, \zeta) = \\ \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma_i(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G_k(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $G_k$  определяется как сумма обычной функции Грина  $G$  и бесконечного множества её зеркальных отображений  $G_m$  в виде следующей суперпозиции [10], [11]:

$$G_k = G + G^N + G^M + G^F, \quad (9)$$

где

$$G^N = \sum_{m=-M_0}^{-1} G_m + \sum_{m=1}^{M_0} G_m \quad (10)$$

$$G^M = \sum_{m=-M_1}^{-1} G_{m1} + \sum_{m=M_0+1}^{M_1} G_{m1} \quad (11)$$

Функция  $G^N$  представляет собой сумму ближайших зеркальных отображений, для которых  $G_m$  необходимо рассчитывать по той же формуле, что и  $G$ .

Функция  $G^F$  представляет собой сумму зеркальных отображений, находящихся на бесконечном удалении от начала координат.

$$G^F = \sum_{m=-\infty}^{-M_1-1} G_{m2} + \sum_{m=M_1+1}^{\infty} G_{m2} \quad (12)$$

Выражение для функции Грина может быть представлено согласно John [7] в виде бесконечных рядов:

$$G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = 2\pi \frac{(v^2 - \mu_0^2) \cosh \mu_0 (\zeta + h) \cosh \mu_0 (\zeta_1 + h)}{(\mu_0^2 - v^2)h + v - iJ_0(\mu_0 R)} (Y_0(\mu_0 R) - iJ_0(\mu_0 R)) + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + v^2) \cos \mu_k (\xi + h) \cos \mu_k (\zeta_1 + h)}{(\mu_k^2 + v^2)h - v} K_0(\mu_k R), \quad (13)$$

где  $\mu_k$  – положительные корни уравнения

$$\mu_k \tan \mu_k h + v = 0 \quad (14)$$

При этом  $\pi(k - \frac{1}{2}) \leq \mu_k h \leq \pi k$ .

При определении  $G_{m2}$ , функции  $Y_0(\mu_0 R_m)$  и  $J_0(\mu_0 R_m)$  следует определять по асимптотическим формулам.

Неизвестные интенсивности источников определяются на основании решения соответствующих систем интегральных уравнений [1], [3], [5].

### Анализ результатов

На основании изложенного были разработаны программы, реализующие определение дополнительного сопротивления при качке судна на мелководье, на мелководье параллельно вертикальной стенке и в мелководном канале на основании трехмерной потенциальной теории по формуле (5). Программы были апробированы в работах [3] и [5].

Расчеты дополнительного сопротивления проводились для четырех различных типов судов при курсовом угле  $\beta = 180$  и различных числах Фруда. Сопротивление приведено в безразмерном виде  $R_{AW} = \frac{\Delta r_{AW}}{\rho g (B^2/L) \zeta_a^2}$ . В таблице 1 приведены основные характеристики данных судов.

Таблица 1

Таблица основных характеристик судов

Тип/ Название судна	L	B	T	δ	α
Лихтеровоз «Севморпуть»	228,8	31,6	11,8	0,656	0,820
Балкер «Капитан Панфилов»	134	20,6	9,4	0,78	0,88
Лесовоз «Николай Новиков»	140	21	8,68	0,74	0,83
Судно «Витус Беринг»	142	22,4	8,5	0,642	0,821

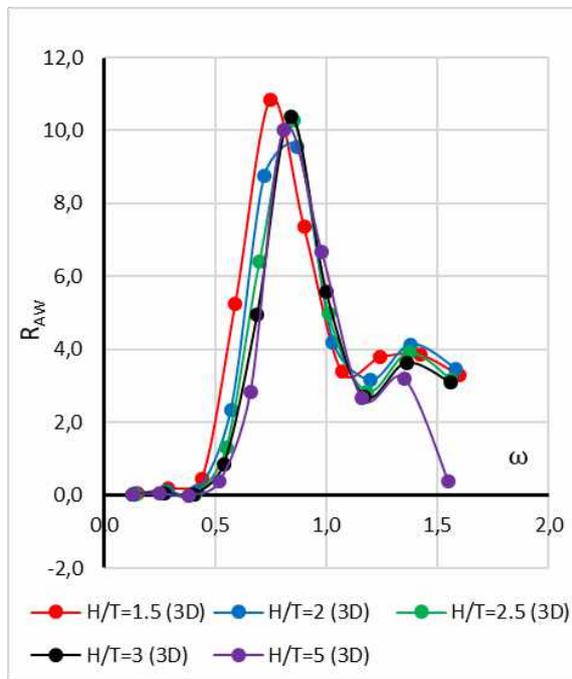


Рис. 1 Значения  $R_{AW}$  при качке на мелководье для судна «Капитан Панфилов» при  $Fr=0.15$ .

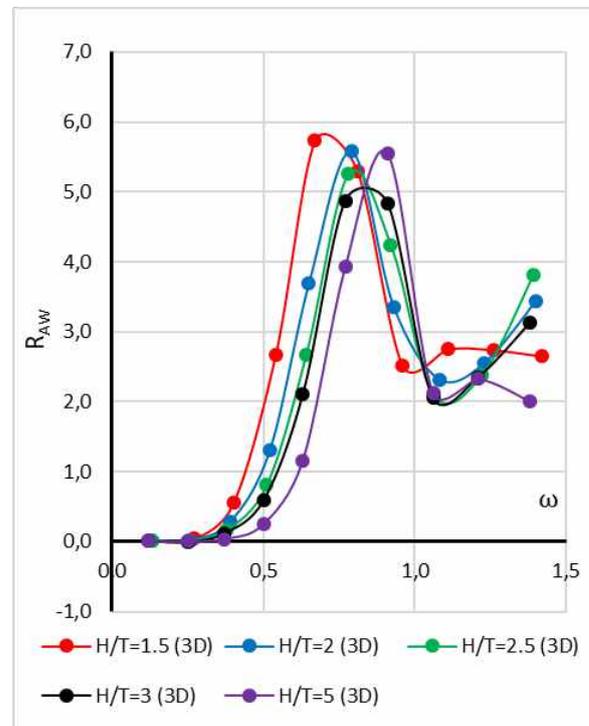


Рис. 2. Значения  $R_{AW}$  при качке на мелководье для судна «Николай Новиков» при  $Fr=0.1$

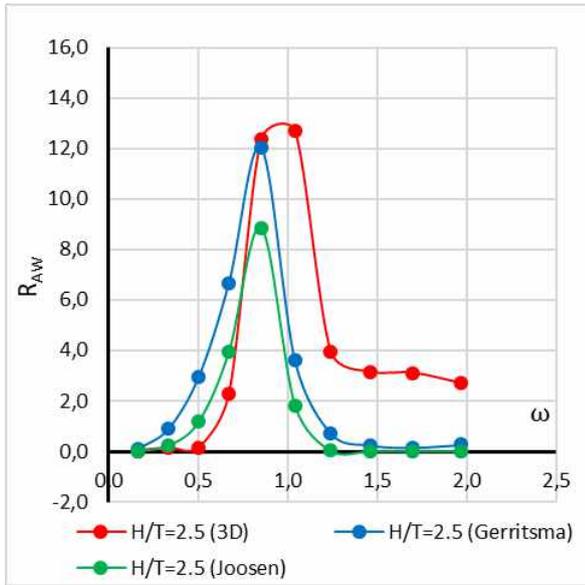


Рис. 4. Значения  $R_{AW}$  при качке на мелководье для судна «Николай Новиков» при  $Fr=0.25$ . Сравнение методов

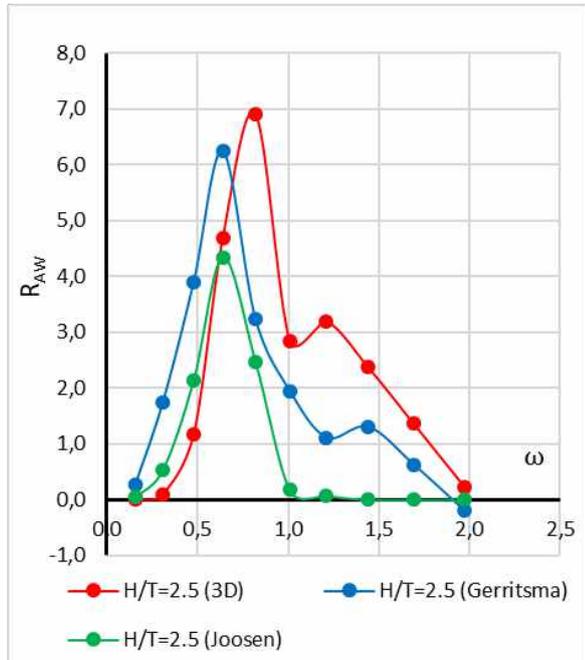


Рис. 5. Значения  $R_{AW}$  при качке на мелководье для судна «Севморпуть» при  $Fr=0.2$ . Сравнение методов

На рис.1-2 представлены значения дополнительного сопротивления в зависимости от частоты волнения и от изменения относительной глубины  $H/T$ , полученные на основании применения формулы (5). Результаты расчетов показывают, что для всех судов наблюдается увеличение дополнительного сопротивления при уменьшении относительной глубины и сдвиг его максимального значения в сторону низких частот. Сдвиг обусловлен тем, что при уменьшении  $H/T$  в ту же сторону сдвигаются амплитуды вертикальной и килевой качки

[1]. Так, для лесовоза «Николай Новиков» на частоте  $\omega=0.6$  наблюдается шестикратное увеличение безразмерного дополнительного сопротивления при  $H/T=1.5$  по сравнению с  $H/T=5$  (рис.2). Для балкера «Капитан Панфилов» на частоте 0.5 наблюдается почти десятикратное увеличение сопротивления при  $H/T=1.5$  по сравнению с  $H/T=2$  (рис. 1)

На рис.4-5 представлены сравнения значений дополнительного сопротивления, полученных по методу Иозена [8], методу Герритсммы [6] и формуле (5). Из всех приведенных сравнений видно, что метод Иозена дает наименьшие значения сопротивления. Кроме того, данный метод не учитывает дифракцию. Поэтому в зоне частот  $\omega>1$  сопротивление принимает практически нулевые значения. Метод Герритсммы приближенно учитывает дифракцию, поэтому в указанной зоне частот большинство судов имеют не нулевое значение сопротивления. Положения максимума по методу Герритсммы совпадают с положением максимума по методу Иозена. Расчеты сопротивления по формуле (5) на основании трехмерной потенциальной теории приводят к некоторому сдвигу максимального значения сопротивления в сторону больших частот и к увеличению значений сопротивления в области частот  $\omega>1$  (рис.4-6). Увеличение сопротивления в данной области связано с точным учетом дифракции, а также взаимодействия дифракции с волнением, обусловленным вертикальной и килевой качкой. Точный учет, в свою очередь, обусловлен учетом квадратичного члена интеграла Лагранжа-Коши и интеграла по свободной поверхности жидкости, учитывающего развал шпангоутов в носовой и кормовой части. Поэтому значения сопротивления при  $\omega>1$  могут превышать значения, полученные по методу Герритсммы в 3 и более раз (рис.4,5)

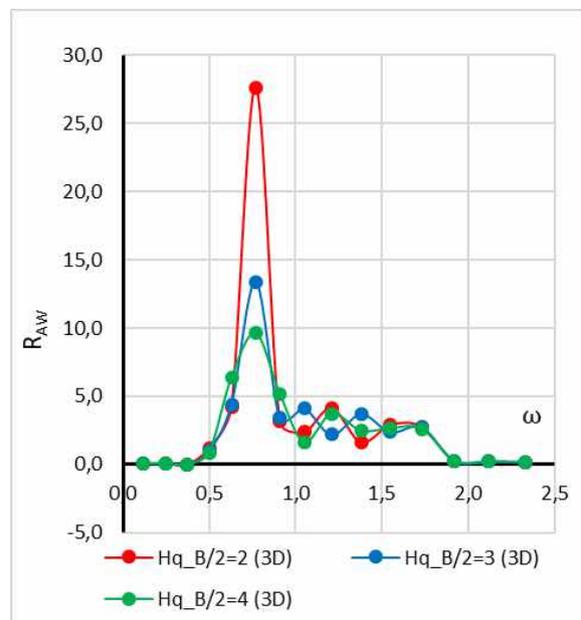


Рис.6. Значения  $R_{AW}$  при качке параллельно вертикальной стенки для судна «Капитан Панфилов» при  $H/T=2,5$ ,  $Fr=0.1$

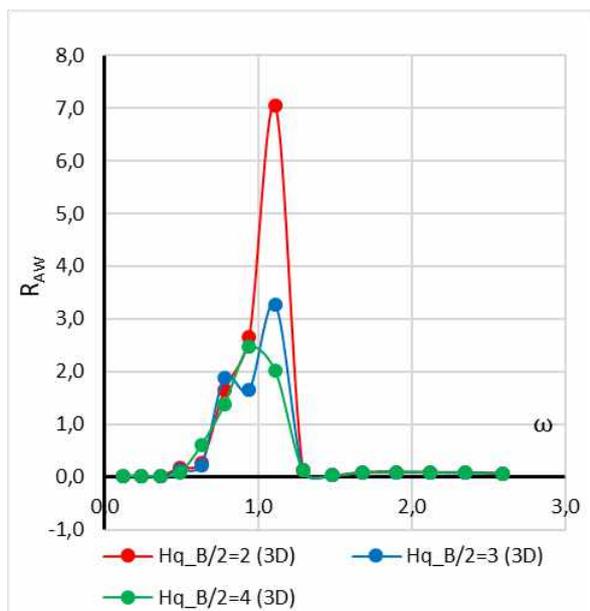


Рис. 7. Значения  $R_{AW}$  при качке параллельно вертикальной стенки для судна «Севморпуть» при  $H/T=5$ ,  $Fr=0.1$

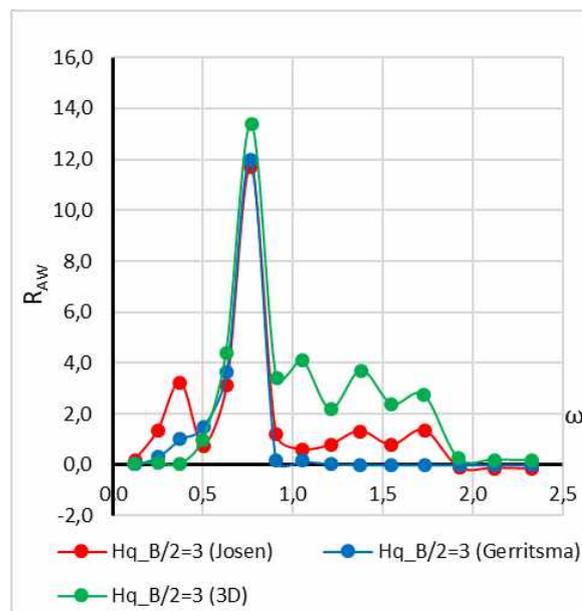


Рис. 9. Значения  $R_{AW}$  при качке параллельно вертикальной стенки для судна «Капитан Панфилов» при  $H/T=2,5$ ,  $Fr=0.1$ . Сравнение разных методов

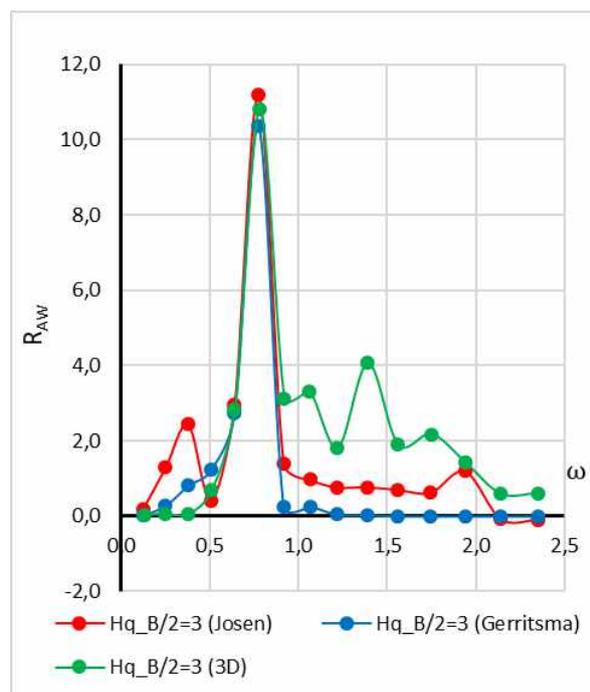


Рис. 8. Значения  $R_{AW}$  при качке параллельно вертикальной стенки для судна «Николай Новиков» при  $H/T=2,5$ ,  $Fr=0.1$ . Сравнение разных методов

На рис.6-7 представлены результаты расчетов дополнительного сопротивления при качке на мелководье параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения относительного расстояния между бортом судна и вертикальной стенкой  $Hq_B/2$ . Результаты расчетов показывают, что уменьшение расстояния до стенки приводит к увеличению значений дополнительного сопротивления. Так, для судна «Капитан Панфилов» при  $\omega=0.75$  дополнительное сопротивление при  $Hq_B/2=2$  в два раза больше сопротивления при  $Hq_B/2=3$  и в 2,8 раз больше сопротивления при  $Hq_B/2=4$  (рис.6). Для судна «Севморпуть» на частоте  $\omega=1.1$  дополнительное сопротивление при  $Hq_B/2=2$  в 3,5 раза больше, чем при  $Hq_B/2=4$  (рис. 7)

В ряде случаев наблюдается некоторый сдвиг максимальных значений  $R_{AW}$  в сторону больших частот при уменьшении относительного расстояния до стенки, что можно наблюдать на рис.7.

На рис.8-9 показано сравнение значений дополнительного сопротивления, полученного согласно приближенным методам и по трехмерной потенциальной теории. Как и в предыдущем случае, отсутствие учета дифракции в методе Иозена приводит к нулевым значениям сопротивления в зоне частот  $\omega > 1$  (рис.8,9). Метод Герритсммы, за счет приближенного учета дифракции дает значительно большие результаты. Расчеты сопротивления по трехмерной потенциальной теории превосходят результаты, полученные на основании метода Герритсммы в 2-4 раза в области частот  $\omega > 1$ .

Потенциалы, входящие в формулу (5) получены на основании метода зеркальных отображений, что позволяет в полной мере учесть влияние волнения, отраженного от стенки. В области максимума сопротивления наблюдается хорошее согласование методов (рис.10,11)

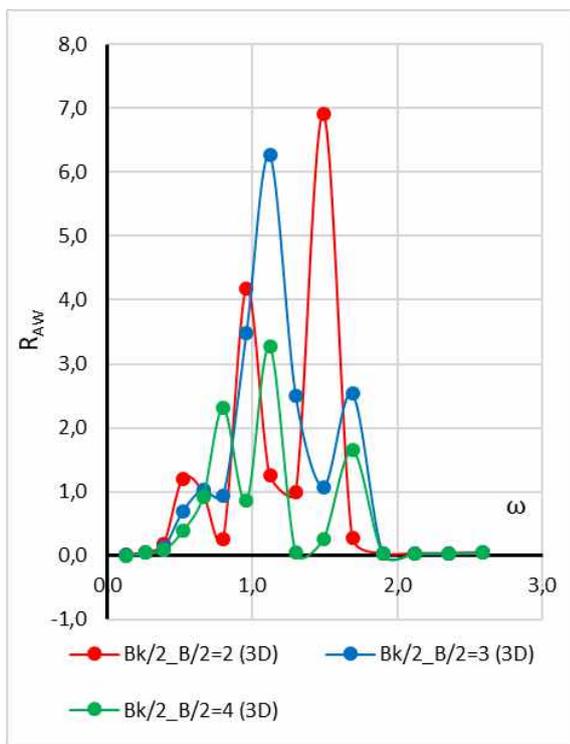


Рис. 10. Значения  $R_{AW}$  при качке в канале для судна «Севморпуть» при  $H/T=2,5$ ,  $Fr=0.1$

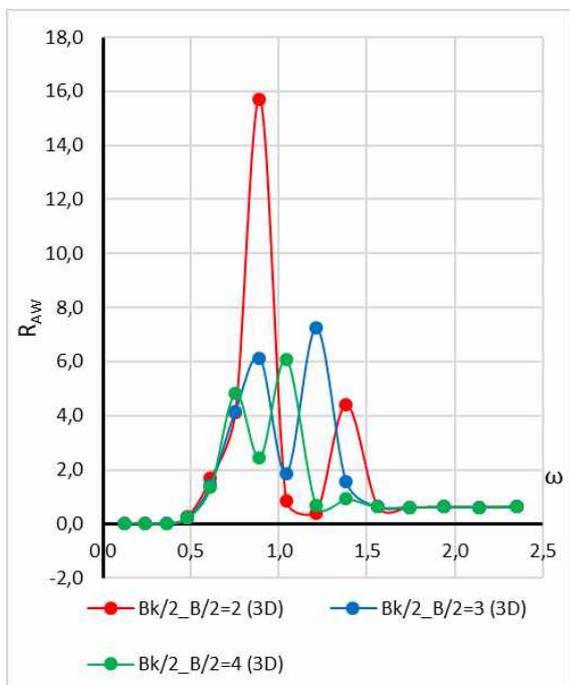


Рис. 11. Значения  $R_{AW}$  при качке в канале для судна «Николай Новиков» при  $H/T=5$ ,  $Fr=0.1$

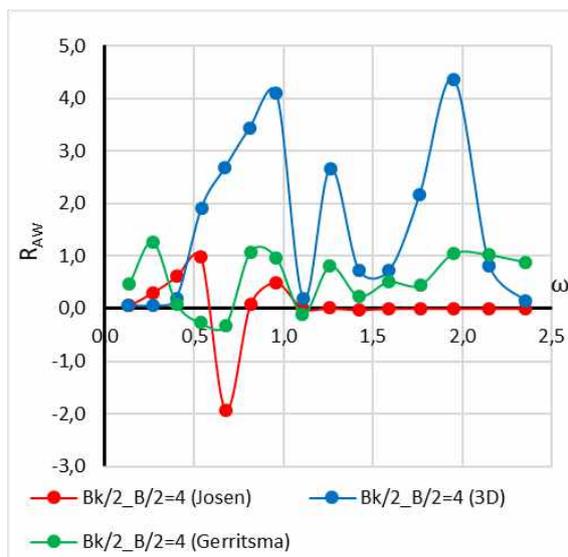


Рис.12. Значения  $R_{AW}$  при качке в канале для судна «Николай Новиков» при  $H/T=1,5$ ,  $Fr=0.1$  Сравнение методов

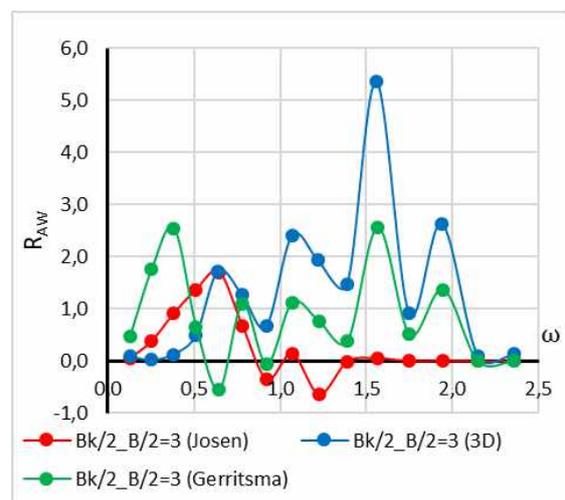


Рис.13 Значения  $R_{AW}$  при качке в канале для судна «Витус Беринг» при  $H/T=2,5$ ,  $Fr=0.1$  Сравнение методов

На рис.10,11 представлены расчеты дополнительного сопротивления в канале при изменении относительной ширины канала  $Bk/2\_B/2$ . Анализ полученных результатов показывает, что уменьшение относительной ширины канала приводит в ряде случаев к значительному возрастанию сопротивления. Так, для лесовоза «Николай Новиков» на частоте  $\omega=0.9$  и относительной ширине канала, равной 2, сопротивление больше в 2,7 раз сопротивления при относительной ширине канала, равной 3 (рис.11).

Также, во многих случаях отмечается некоторое смещение максимального значения сопротивления в область больших частот при уменьшении относительной ширины канала (рис.10,11).

На рис.12,13 показано сравнение значений сопротивления, полученного по приближенным методам Иозена и Герритсмы и по трехмерной потенциальной теории. Приближенные методы, не учитывающие дифракцию вовсе или учитывающие ее приближенно, дают для ряда значений частот отрицательные значения, что невозможно для случая встречного волнения. Ясно, что для расчета дополнительного сопротивления при качке судна в канале нельзя использовать приближенные методы, не учитывающие отражение волнения от стенок канала и его интерференции с волнением, вызванным продольной качкой. Для определения дополнительного сопротивления в данном случае можно использовать только формулу (5), учитывающей отражение посредством применения метода зеркальных отображений для определения входящих в нее потенциалов. Наличие осцилляции на графиках (рис.12,13) также связано с учетом отраженного волнения от стенок канала [3], [10], [12].

### Заключение

В статье рассмотрено определение дополнительного сопротивления судна, обусловленного качкой на мелководье, на мелководье параллельно вертикальной стенке и в канале на основании трехмерной потенциальной теории. Для разных типов судов зависимости дополнительного сопротивления качественно похожи. Показана невозможность использования приближенных методов при расчете сопротивления в канале в связи с отсутствием учета отражения волнения от стенок.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы в оценке дополнительного сопротивления при качке на косых и попутных курсовых углах, а также при расчетах дополнительного сопротивления в условиях нерегулярного волнения

### Литература

1. Тан Хтун Аунг (2011). Разработка метода расчета качки судов на мелководье на основе трехмерной потенциальной теории. Дисс. На соискание уч. степени к.т.н. СПбГМТУ.
2. Со Мое Аунг (2012), Определение сил волнового дрейфа при качке судна параллельно вертикальной преграде на мелководье Морской Вестник, Специальный выпуск N1 (124), с.25-28
3. Со Мое Аунг (2014). «Разработка методов расчета и исследование качки судна в мелководных стесненных фарватерах» Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. С.-Петербург.
4. Семенова В.Ю., Борисов Р.В., Щегорец С.В. (2013) Исследование влияния относительной глубины фарватера и курсового угла на силы волнового дрейфа при качке судна на мелководье. Морской Вестник, Специальный выпуск N2 (125), с.76-81
5. Щегорец С.В. (2014) Исследование и разработка численного метода определения сил волнового дрейфа при качке объекта в условиях мелководья. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. С.-Петербург
6. Gerritsma, J and Beukelman, W (1972). Anlysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship. International Shipbuilding Progress, 19:285-293.
7. John F., (1950). On the Motion of Floating Bodies // Comm. Pure and Applied Mathematics. , vol. 3., pp. 45-1014.
8. Joosen, W.P.A., (1966). Added resistance in waves. In: Proceedings of the Sixth Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington.
9. Maruo, H., (1957). The excess resistance of a ship in rough seas. International Shipbuilding Progress 4 (35) July.
10. Xia J., Krokstad J.R. (2001) Wave forces on a body in confined waters. 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Australia, 2001.
11. Xia J., (2002). Some insight into the Green function of the channel problem. 17th International Workshop on water waves and Floating Bodies, Cambridge, UK, 2002.
12. Xia J., (2001). Evaluation of the Green function for 3-D wave-body interactions in a channel. Journal of Engineering mathematics, v.40, pp.1-26, 2001.

### References

1. Tan Khtun Aung (2011). Razrabotka metoda rascheta kachki sudov na melkovod'e na osnove trekhmernoy potentsial'noy teorii. Diss. Na soiskanie uch. stepeni k.t.n. SPbGMTU.
2. So Moe Aung (2012), Opreделение sil volnovogo dreyfa pri kachke sudna parallel'no vertikal'noy pregrade na melkovod'e [Determination of wave drift forces during the ship's motions parallel to a vertical obstacle in shallow water] Morskoy Vestnik, Spetsial'nyy vypusk N1 (124), c.25-28.
3. So Moe Aung (2014). «Razrabotka metodov rascheta i issledovanie kachki sudna v melkovodnykh stesnennykh farvaterakh» Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. S.-Peterburg, 2014
4. Semenova V.Yu., Borisov R.V., Shchegorets S.V. (2013) Issledovanie vliyaniya odnositel'noy glubiny farvatery i kursovogo ugla na sily volnovogo dreyfa pri kachke sudna na melkovod'e. [ Investigation of the influence of the relative depth of the fairway and the heading angle on the forces of wave drift during the ship's motions in shallow water] Morskoy Vestnik, Spetsial'nyy vypusk N2 (125), c.76-81
5. Shchegorets S.V. (2014) Issledovanie i razrabotka chislennogo metoda opredeleniya sil volnovogo dreyfa pri kachke ob"ekta v usloviyakh melkovod'ya Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. S.-Peterburg, 2014
6. Gerritsma, J. and Beukelman, W., (1972): Anlysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship. International Shipbuilding Progress, 19:285-293.
7. John F., (1950). On the Motion of Floating Bodies // Comm. Pure and Applied Mathematics, vol. 3., pp. 45-1014
8. Joosen, W.P.A., (1966). Added resistance in waves. In: Proceedings of the Sixth Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington

9. Maruo, H., (1957). The excess resistance of a ship in rough seas. International Shipbuilding Progress 4 (35) July.
10. Xia J., Krokstad J.R. (2001) Wave forces on a body in confined waters. 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Australia.
11. Xia J., (2002) Some insight into the Green function of the channel problem. 17th International Workshop on water waves and Floating Bodies, Cambridge, UK.
12. Xia J., (2001) Evaluation of the Green function for 3-D wave-body interactions in a channel. Journal of Engineering mathematics, v.40, pp.1-26.

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 28.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 03.08.2022.

## Научная статья

УДК: 656.61.052.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.009>

## Анализ процесса одерживания поворота судна

А.С. Васьков<sup>1</sup> as.vaskov@mail.ru, А.Н. Штанько<sup>1</sup> a.n.shtanko@internet.ru, А.В. Еськова<sup>1</sup> eskann68@gmail.com  
<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** При маневрировании судна отсутствуют методы определения начала одерживания поворота в ручном и автоматическом режимах. На основе экспериментальных маневров предлагается способ нахождения точки одерживания поворота установившейся циркуляции судна, основанный на разделении элементов поворота на периоды с последующей их аппроксимацией различными функциями. Произведена оценка качества аппроксимации, доказана эффективность выбранных функций. Для выполнения расчетов использовались записи данных движения имитационной модели, полученные с использованием судоводительского тренажера. Серия проведенных экспериментов включала временные ряды измерений с последующим сглаживанием методом на основе функции Гаусса, при циркуляции судна с различными кладами руля. Использование предложенного способа возможно как при табличном учете циркуляции, так и для формирования командного сигнала систем автоматического управления судном.

**Ключевые слова:** Точка одерживания поворота, угловая скорость, маневрирование, программное управление, аппроксимация.

**Для цитирования:** Васьков А.С., Штанько А.Н., Еськова А.В. Анализ процесса одерживания поворота судна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 71—76.

## Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.009>

## Analysis of the process of obsessing the turning of the vessel

Anatoliy S. Vas'kov<sup>1</sup> e-mail: as.vaskov@mail.ru,  
 Aleksandr N. Shtanko<sup>1</sup> a.n.shtanko@internet.ru, Anna V. Eskova<sup>1</sup> eskann68@gmail.com  
<sup>1</sup>Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** When maneuvering a vessel, there are no methods for determining the beginning of the obsession of turning in manual and automatic modes. Based on experimental maneuvers, a method is proposed for finding the point of obsession of the rotation of the steady circulation of the vessel, based on the division of the elements of rotation into periods with their subsequent approximation by various functions. The quality of the approximation is evaluated, the effectiveness of the selected functions is proved. To perform the calculations, records of the motion data of the simulation model obtained using a navigation simulator were used. A series of experiments included time series of measurements with subsequent smoothing by the method based on the Gauss function, during the circulation of a vessel with different rudder masonry. The use of the proposed method is possible both for tabular circulation accounting and for the formation of a command signal of automatic ship control systems.

**Key words:** Turning point, angular velocity, maneuvering, program control, approximation.

**For citation:** Anatoliy S. Vas'kov, Aleksandr N. Shtanko, Anna V. Eskova Analysis of the process of obsessing the turning of the vessel, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 71—76.

## Введение

Одной из основных функций систем автоматического управления судном (САУ) является регулирование, т.е. поддержание на определенном уровне или изменение по требуемому закону управляемого параметра (курса, скорости судна) [2, 11, 15].

Классической задачей управления движением судна с использованием авторулевых является его стабилизация на заданном курсе [4, 11], в свою очередь, при управлении судном при повороте, как правило, используются следующие способы настроек изменения курса судна:

скорость изменения курса – самый часто используемый метод поворота судна, настраиваемый в пределах  $1 \div 300^\circ/\text{мин}$ ;  
 настройка предела поворота руля от  $1^\circ$  и до максимального возможного.

Не смотря на возможности современных

авторулевых судоводитель при использовании любого метода должен учитывать маневренные характеристики судна, а при маневрировании определять точку начала поворота (ТНП) и точку одерживания поворота (ТОП) [10].

Безопасность мореплавания является важнейшей проблемой мирового судоходства, находящейся в фокусе внимания Международной морской организации (ИМО). На основании Правил V/19 SOLAS-74 для судов, валовой вместимостью 50 тыс. рег.т. и более, обязательным прибором является датчик угловой скорости поворота судна. Датчик угловой скорости обладает практически мгновенным быстродействием, что позволяет определить тенденцию и значение угловой скорости поворота судна до того, как рулевой воспримет это по репитеру гирокомпаса.

Использование для формирования командного сигнала угловой скорости поворота позволит существенно повысить качество работы САУ судна.

В данной работе рассматривается способ нахождения ТОП, который может использоваться как в САУ судна, так и при управлении судном на циркуляции в ручном режиме.

### 1. Постановка задачи

Для нахождения ТОП использовались исследования [10] записи данных движения имитационной модели быстроходного, устойчивого на курсе судна водоизмещением 700 тонн на спокойной воде со скоростью 12 узлов полученные с использованием судоводительского тренажера, рис.1. Такой набор данных может быть получен в результате ходовых испытаний или измерен в процессе эксплуатации судна при поворотах с различными кладками руля.

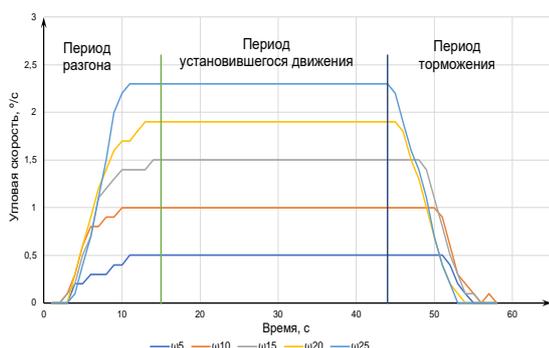


Рис.1. Характер изменения угловой скорости судна при различных кладках руля  $\omega 5^{\circ}$ ,  $\omega 10^{\circ}$ ,  $\omega 15^{\circ}$ ,  $\omega 20^{\circ}$ ,  $\omega 25^{\circ}$  – угловая скорость циркуляции судна с соответствующей перекладкой пера руля.

На основании работ [4, 10], для аналитического представления движения судна на повороте, целесообразно его разделить на отдельные участки (периоды) в функциональной зависимости от значений угловой скорости поворота судна и угла перекладки руля во времени, рис.1, 2:

- период разгона – неустановившееся движение  $T_1$  – от  $t_1$  до  $t_2$ ;
- период установившегося движения  $T_2$  – от  $t_2$  до  $t_3$ ;
- период торможения  $T_3$  – от  $t_3$  до  $t_4$ .

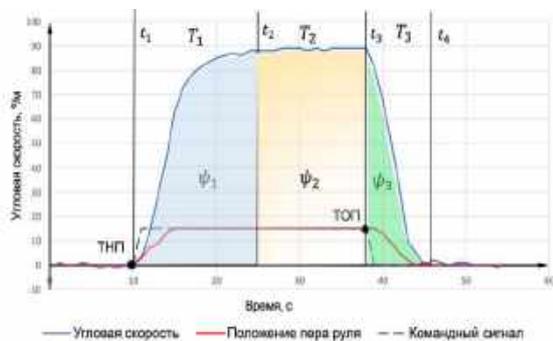


Рис.2. Разделение элементов поворота судна на отдельные периоды.

В соответствии с измеренными данными, период разгона для всех кривых угловых скоростей принят равным  $T_1 = 15$  с. Период торможения равен временному промежутку от ТОП до момента, когда угловая скорость движения судна примет нулевое

значение, данные временные значения указаны в табл.2, 4.

Изменение курса судна по периодам циркуляции предлагается представить суммой ее составляющих по выражению

$$\psi = \int_{t_1}^{t_4} \omega dt = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3, \quad (1)$$

где  $\psi$  – изменение курса на циркуляции, °;  $\omega$  – угловая скорость движения судна на циркуляции, °/с;  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  – изменения курса по периодам циркуляции, °.

### 2. Сглаживание наблюдаемых параметров

Для осуществления дальнейших расчетов, необходимо выполнить предварительную обработку (сглаживание) измеренных данных, с целью снижения уровня разного рода помех и шумов. В исследованиях [5, 9] рассмотрено множество способов сглаживания измеренных навигационных параметров. В данном случае предлагается обработка полученных временных рядов методом сглаживания на основе функции Гаусса [3, 7], рис.3.

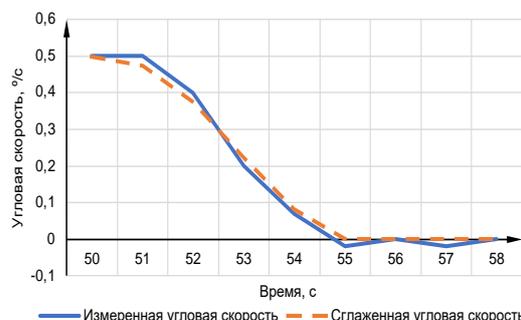


Рис.3. Фрагмент сглаженных и измеренных значений угловой скорости судна.

### 3. Выбор аппроксимирующей функции

Изменения курса по периодам циркуляции  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  предлагается представить в соответствии с принципами [4,] отдельными выражениями

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) dt; \\ \psi_2 &= \omega_{зад} (t_3 - t_2); \\ \psi_3 &= \int_{t_3}^{t_4} f_3(t) dt, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\omega_{зад}$  – угловая скорость поворота, выбираемая судоводителем;  $f_1(t), f_3(t)$  – функции, показывающие изменение угловой скорости судна в периоды разгона и торможения судна.

Записи данных движения судна в табличном и графическом виде не позволяют определить закон изменения угловой скорости, который необходим для последующего вычисления значений интегралов (2). Поэтому предлагается решить задачу аппроксимации – замены экспериментальных данных аналитическим выражением, отражающим все существенные свойства изучаемого процесса с достаточной степенью точности [1, 8].

В качестве аппроксимирующих функций предлагаются тригонометрическая (сумма синусов) и полиномиальная, которые показали достаточную степень приближения к исходным данным:

$$f(t) = \sum_{i=1}^3 a_i \sin(b_i t + c_i); \quad i=1,2,3; \quad (3)$$

$$f(t) = \sum_{i=1}^6 k_i t^i; \quad i=1,2,\dots,6, \quad (4)$$

где  $a_i, b_i, c_i, k_i$  – искомые коэффициенты аппроксимации,  $t$  – время, с.

С помощью инструментов MATCAD, определяются значения коэффициентов аппроксимаций изменения курса (3), (4) для периодов разгона и торможения  $\psi_1, \psi_3$ , которые приведены в табл.1-4.

Таблица 1

Значения коэффициентов тригонометрической аппроксимации (период  $\psi_1$ )

Коэффициент	Значения коэффициентов при изменении курса с различными кладками руля				
	5°	10°	15°	20°	25°
$T_1$	15 с	15 с	15 с	15 с	15 с
$a_1$	0,5796	1,874	1,757	4,319	7,639
$b_1$	0,1615	0,1449	0,2008	0,1608	0,1545
$c_1$	-0,3318	1,42	-0,4792	1,021	1,39
$a_2$	0,1342	2,062	0,7983	4,14	7,801
$b_2$	0,2665	0,1564	0,3901	0,1856	0,1798
$c_2$	2,36	4,962	1,641	4,325	4,542
$a_3$	0,02524	0,06126	0,4043	0,1236	0,1334
$b_3$	1,175	0,678	0,5812	0,7551	0,8149
$c_3$	0,8261	3,232	3,197	2,091	0,4309
$\varepsilon$	0,017	0,027	0,02	0,021	0,016

Таблица 2

Значения коэффициентов тригонометрической аппроксимации (период  $\psi_3$ )

Коэффициент	Значения коэффициентов при изменении курса с различными кладками руля				
	5°	10°	15°	20°	25°
$T_3$	8 с	10 с	12 с	16 с	18 с
$a_1$	0,375	1,474	1,144	1,401	21,12
$b_1$	0,3376	0,3585	0,2264	0,1164	0,007039
$c_1$	2,935	1,665	2,891	2,762	9,028
$a_2$	0,1976	1,092	0,5544	0,5365	0,4443
$b_2$	0,7199	0,4695	0,4651	0,3271	0,408
$c_2$	3,345	11,1	5,111	6,274	-4,149
$a_3$	0,006915	0,027	0,008174	0,07779	0,03444
$b_3$	1,936	1,701	0,7877	0,6145	1,04
$c_3$	-22,72	-15,93	15,21	10,71	-11,79
$\varepsilon$	0,009	0,014	0,021	0,017	0,022

Таблица 3

Значения коэффициентов полиномиальной аппроксимации (период  $\psi_1$ )

Коэффициент	Значения коэффициентов при изменении курса с различными кладками руля				
	5°	10°	15°	20°	25°
$T_1$	15 с	15 с	15 с	15 с	15 с
$k_6$	0,252	0,40	0,1126	0,102	-0,247
$k_5$	-0,436	-0,652	0,237	-0,1057	0,456
$k_4$	0,231	0,318	-0,1734	-0,0157	-0,2793
$k_3$	-0,049	-0,055	0,0583	0,0282	0,072
$k_2$	$5,07 \cdot 10^{-3}$	$4,73 \cdot 10^{-3}$	$-7,589 \cdot 10^{-3}$	$-4,71 \cdot 10^{-3}$	$-7,371 \cdot 10^{-3}$
$k_1$	$-2,581 \cdot 10^{-4}$	$-2,008 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$2,969 \cdot 10^{-4}$	$3,274 \cdot 10^{-4}$
$\varepsilon$	0,0058	0,015	0,0068	0,0087	0,017

Таблица 4

**Значения коэффициентов полиномиальной аппроксимации (период  $\psi_3$ )**

Коэффициент	Значения коэффициентов при изменении курса с различными кладками руля				
	5°	10°	15°	20°	25°
$T_3$	8 с	10 с	12 с	16 с	18 с
$k_6$	$9.617 \cdot 10^5$	$8.475 \cdot 10^5$	$3.523 \cdot 10^5$	$5.051 \cdot 10^4$	$1.223 \cdot 10^4$
$k_5$	$-1,073 \cdot 10^5$	$-9,559 \cdot 10^4$	$-4,065 \cdot 10^4$	$-5,993 \cdot 10^3$	$-1,39 \cdot 10^3$
$k_4$	$4.98 \cdot 10^3$	$4.485 \cdot 10^3$	$1.95 \cdot 10^3$	294,828	64,721
$k_3$	-123,166	-112,101	-49,787	-7,696	-1,575
$k_2$	1,711	1,574	0,713	0,112	0,021
$k_1$	-0,012	-0,01	-0,0054	-0,00087	-0,00014
$\varepsilon$	0,0015	0,009	0,004	0,007	0,018

Оценка качества аппроксимации осуществляется средней абсолютной погрешностью

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \cdot \sum |\psi - f(t)|, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  - средняя абсолютная (предельная) погрешность;  $n$  - длина временного интервала;  $\psi$  - измеренные сглаженные значения угловой скорости;  $f(t)$  - аппроксимирующая функция.

Чем ближе погрешность (5) к нулю, тем лучше функция  $f(t)$  аппроксимирует эмпирические данные, тем теснее наблюдения примыкают к линии графика функции.

Графический вид сглаженных значений угловой скорости, а также значений, аппроксимированных функциями (3), (4) для периода  $\psi_1$ , при циркуляции с перекладкой руля 15° представлен на рис.4.

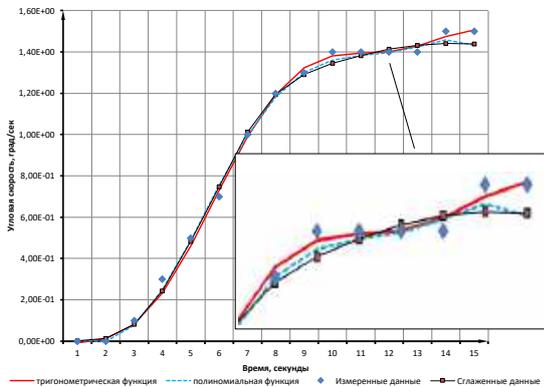


Рис.4. Фрагмент сглаженных и аппроксимированных значений угловой скорости судна.

Результаты моделирования периодов разгона и торможения  $\psi_1, \psi_3$  при повороте и одерживании судна по выражениям (2) для сравнения обоих типов аппроксимаций (3), (4) приведены на рис.5.

Значение установившегося периода  $\psi_2$  циркуляции судна определяется выражением

$$\psi_2 = \psi (\psi_1 + \psi_3). \quad (6)$$

Перед началом циркуляции судоводитель самостоятельно выбирает (задает) требуемую угловую скорость поворота, на основании которой можно получить из выражений (2), (6) элементы периодов поворота для определения ТОП:

$$\omega_{зад} (t_3 - t_2) = \psi (\psi_1 + \psi_3);$$

$$\Delta t = (t_3 - t_2); \quad \Delta t = \frac{\psi (\psi_1 + \psi_3)}{\omega_{зад}}. \quad (7)$$

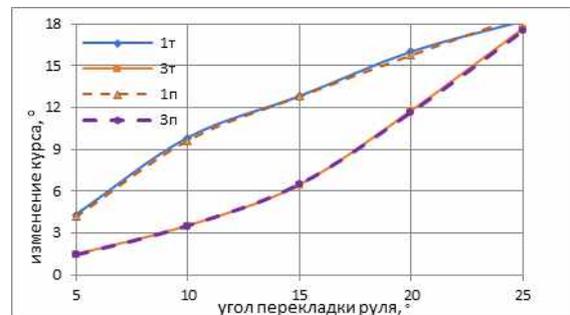


Рис.5. Результаты моделирования поворота и одерживания судна: 1, 3 – периоды разгона и торможения; t – тригонометрическая аппроксимация (3); p – аппроксимация полиномом (3).

Соответственно, момент ТОП судна определяется из выражений (7)

$$T_{ТОП} = T_1 + \Delta t,$$

где  $T_{ТОП}$  - момент ТОП судна.

**Заключение**

Полиномиальная и тригонометрическая аппроксимации периодов разгона и одерживания при повороте судна практически совпадают (см.рис.5). По значениям абсолютных погрешностей полиномиальная функция шестой степени (4), в отличие от тригонометрической (3), лучше аппроксимирует экспериментальные данные (см.табл.1-4). Между тем, рассчитанные значения периодов разгона  $\psi_1$  и торможения  $\psi_3$  отличаются друг от друга незначительно (см. рис.5).

Полученные зависимости при наличии на судне датчика угловой скорости позволяют сделать расчеты для различных скоростей движения судна, дополнив буклет маневренных характеристик для традиционных (ручных) методов управления.

Использование данных способов в САУ позволит адаптировать систему к различным режимам маневрирования судна. Вариант построения подобных систем управления рассмотрен авторами в работе [6], что позволяет существенно повысить качество управления маневрами судна.

### Литература

1. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М., Бином, 2004, 636 с.
2. Бурылин Я.В., Васьков А.С. Адаптивное управление угловой скоростью поворота судна // Эксплуатация морского транспорта. 2016. № 4 (81). С. 37-42.
3. Васильев В.П., Муро Э.Л., Смольский С.М. Основы теории и расчета цифровых фильтров. Под. ред. С.М. Смольского. М., ИНФРА-М, 2018, 272 с.
4. Васьков А.А., Васьков А.С. Разделение задач управления движением судна // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2002. № 3. С. 51-54.
5. Васьков А.С., Грищенко А.А. Сопровождение параметров траектории движения судна // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4 (46). Т.3. С.77 – 82.
6. Васьков А.С., Штанько А.Н. Построение дискретной адаптивной системы управления параметром движения судна с прогнозирующей моделью на основе MPC-регулятора // Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 1(102).
7. Кирьянов Д.В. MathCad 15 / MathCad Prime 1.0. СПб.: BHV, 2012. 432 с.
8. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М., Физматгиз, 1958, 334 с.
9. Мельник В.Г. Методы обработки рядов траекторных измерений в системах прогнозирования и контроля движения судна. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. (05.22.19). Новороссийск, ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2016, 24 с.
10. Мельник В.Г., Штанько А.Н. Исследование взаимного изменения элементов поворота судна // Эксплуатация морского транспорта. 2018. №3. С. 36-44.
11. Меньшенин О.И. Васьков А.С. Основы построения систем автоматического управления движением судна. М.: В/О «Мортехинформреклама», 1985. 76 с.
12. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. Л., Судостроение, 1983, 272 с.
13. Поршнева С.В. Численные методы на базе Mathcad. СПб., BHV, 2005. 464 с.
14. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М., Наука, 1966, 624 с.
15. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. М., Наука, 1977, 560 с.

### References

1. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Chislennyye metody [Numerical methods]. M.: Binom, 2004. – 636 s.
2. Burylin Ya.V., Vas'kov A.S. Adaptivnoye upravleniye uglovoy skorost'yu povorota sudna. [Adaptive control of the angular rate of rotation of the vessel]. Eksploatatsiya morskogo transporta. 2016. № 4 (81). S. 37-42.
3. Vasil'ev V.P., Muro E.L., Smol'skiy S.M. Osnovy teorii i rascheta tsifrovyykh fil'trov: pod. red. S.M. Smol'skogo. - 2-e izd., stereotip. [Fundamentals of the theory and calculation of digital filters]. M.: INFRA-M, 2018. – 272 s
4. Vas'kov A.A., Vas'kov A.S. Razdeleniye zadach upravleniya dvizheniem sudna. [Separation of ship traffic management tasks]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnichesknie nauki. 2002. № 3. S. 51-54.
5. Vas'kov A.S., Grishchenko A.A. Soprovozhdeniye parametrov traektorii dvizheniya sudna. [Support of the parameters of the trajectory of the vessel]. Morsknie intellektual'nyie tekhnologii. 2019. № 4 (46). T.3. S.77 – 82.
6. Vas'kov A.S., Shtan'ko A.N. Postroeniye diskretnoy adaptivnoy sistemy upravleniya parametrom dvizheniya sudna s prognoziryuyushchey model'yu na osnove MPC-regulyatora. [Construction of a discrete adaptive control system for the vessel motion parameter with a predictive model based on the MPC controller]. Eksploatatsiya morskogo transporta – 2022. - № 1(102).
7. Kir'yanov D.V. MathCad 15 / MathCad Prime 1.0. SPb.: BHV, 2012. 432 s.
8. Linnik Yu.V. Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy. [The least squares method and the foundations of the mathematical and statistical theory of observation processing]. M.: Fizmatgiz, 1958. 334 s.
9. Mel'nik V.G. Metody obrabotki ryadov traektornykh izmereniy v sistemakh prognozirovaniya i kontrolya dvizheniya sudna Avtoref. diss. na soisk. uch. st. k.t.n. (05.22.19). [Methods of processing series of trajectory measurements in systems of forecasting and control of vessel movement]. Novorossiysk: GMU im. admirala F.F. Ushakova, 2016. 24 s.
10. Mel'nik V.G., Shtan'ko A.N. Issledovanie vzaimnogo izmeneniya elementov povorota sudna [Investigation of the mutual change of the elements of the ship's rotation] Eksploatatsiya morskogo transporta. 2018. №3. S. 36-44.
11. Men'shenin O.I. Vas'kov A.S. Osnovy postroeniya sistem avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna [Fundamentals of building automatic vessel motion control systems.]. M.: VO «Mortekhinformreklama», 1985. 76 s.
12. Pershits R.Ya. Upravlyaemost' i upravleniye sudnom. [Controllability and control of the vessel]. L.: Sudostroenie, 1983. 272 s.
13. Porshnev S.V. Chislennyye metody na baze Mathcad. [Numerical methods based on Mathcad]. SPb.: BHV, 2005. 464 s.
14. Fel'dbaum A.A. Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh sistem. [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]. M.: Nauka, 1966. 624 s.
15. Tsyypkin Ya.Z. Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem. [Fundamentals of the theory of automatic systems]. M.: Nauka, 1977. 560 s.

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

**Анатолий Семенович Васьков**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Судовождение, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 393518, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: as.vaskov@mail.ru

**Anatoliy S. Vas'kov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov State Maritime University, 353918, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, Russian Federation, e-mail: as.vaskov@mail.ru

**Анна Владимировна Еськова**, кандидат технических наук, 353440, Краснодарский край, г. Анапа, ул. Владимирская, 55в2, e-mail: eskann68@gmail.com

**Anna V. Eskova**, Ph.D. (Eng), 353440, Russian Federation, Anapa, Vladimirskaaya st., 55v2, e-mail: eskann68@gmail.com

**Александр Николаевич Штанько**, аспирант кафедры Судовождение, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 393518, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: a.n.shtanko@internet.ru

**Aleksander N. Shtanko**, graduate student of the Department of Navigation, Admiral Ushakov State Maritime University, 353918, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, Russian Federation, e-mail: a.n.shtanko@internet.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 22.02.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 10.07.2022.

Научная статья

УДК 539.372:532.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.010>

## Численное моделирование динамического процесса столкновения судов на основе связанной задачи движения одномерных моделей в жидкости

А.А. Родионов<sup>1</sup> rodionovsmk@yandex.ru, Е.А. Карпенко<sup>1</sup> evgeniakappenko@gmail.com,

В.А. Коршунов<sup>1</sup> korshunov@corp.smtu.yandex.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** Объектом исследования данной статьи является процесс динамического столкновения судов. Сталкивающиеся суда представляются деформируемыми одномерными моделями с учетом сопротивления воды. Разработаны математические модели судов на основе одномерных уравнений теории балок и стержней. Анализ влияния воды на движение сталкивающихся судов выполнен с помощью аналитических методов гидроупругости. Для учета внедрения носа таранящего судна в борт таранимого судна использован коэффициент жесткости, который получен в результате обработки опубликованных численных результатов анализа столкновения трехмерных моделей судов. Проведено исследование различных способов учета влияния сопротивления воды на кинематические и энергетические параметры судов. Расчеты приведены для материала, подчиняющегося закону линейного упрочнения для случая одноосного растяжения, с использованием диаграммы пластического течения с учетом разгрузки материала.

**Ключевые слова:** столкновение судов, динамический процесс соударения, сила сопротивления воды, одномерные модели, численное моделирование, контактная зона удара, упругопластический материал, поглощенная энергия.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ № 075-03-2020-094/1 от 10.06.2020

**Для цитирования:** Родионов А.А., Карпенко Е.А., Коршунов В.А. Численное моделирование динамического процесса столкновения судов на основе связанной задачи движения одномерных моделей в жидкости, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 77—83.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.010>

## Numerical simulation of the dynamic process of ship collision based on the coupled problem of the motion of one-dimensional models in a fluid

Alexander A. Rodionov<sup>1</sup> rodionovsmk@yandex.ru, Evgeniya A. Karpenko<sup>1</sup> evgeniakappenko@gmail.com,

Vladimir A. Korshunov<sup>1</sup> korshunov@corp.smtu.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** The object of research of this article is the process of dynamic collision of ships. Colliding vessels are represented by deformable one-dimensional models taking into account water resistance. Mathematical models of ships based on one-dimensional equations of the theory of beams and rods have been developed. The analysis of the influence of water on the movement of colliding ships was carried out using analytical methods of hydroelasticity. To account for the introduction of the bow of the impacting ships into the side of the impacted ship, the stiffness coefficient was used, which was obtained as a result of processing the published numerical results of the collision analysis of three-dimensional models of ships. A study of various ways of accounting for the influence of water resistance on the kinematic and energy parameters of ships has been carried out. Calculations are given for a material obeying the linear hardening law for the case of uniaxial stretching, using a plastic flow diagram taking into account the unloading of the material.

**Keywords:** ship collision, dynamic collision process, water resistance force, one-dimensional models, numerical modeling, impact contact zone, elastic-plastic material, absorbed energy.

**Financial Support:** The study was done with a support of the state assignment (Theme No. 075-03-2020-094/1 dates 10 June 2020).

**For citation:** Alexander A. Rodionov, Evgeniya A. Karpenko, Vladimir A. Korshunov Numerical simulation of the dynamic process of ship collision based on the coupled problem of the motion of one-dimensional models in a fluid, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 77—83.

### Введение

Столкновения судов являются наиболее частыми навигационными авариями [1-3]. Кроме локальных повреждений корпуса таранимого судна в зоне контакта, большую опасность для оборудования; энергетических установок судов; а также для судовых механизмов, находящихся вне непосред-

ственной зоне контакта, представляют превышения критических значений динамических и кинематических параметров состояния судна.

Оценка состояния важных узлов судна, грузов в судовых отсеках и судовых механизмов определяется по значениям перегрузок и скоростей, для анализа которых в динамическом процессе

столкновения необходим учет фактора сопротивления внешней среды (воды).

Для определения превышения критических значений кинематических параметров судна необходимы построение динамических моделей судов и моделирование их взаимодействия в зоне контакта и взаимодействия с внешней водной средой, способной оказывать существенную роль в динамике соударения.

В работах [4-6] оценивается напряженно-деформированное состояние корпусных конструкций судов при столкновениях. При этом предполагается, что таранимое судно неподвижно в течение всего процесса столкновения и влияние воды как сжимаемой жидкости на начальном этапе движения обоих судов в процессе столкновения не учитывается. Поэтому представление модели таранимого судна как деформируемого и подвижного твердого тела, в процессе всего временного промежутка столкновения, и учет сопротивления со стороны забортной воды позволят дать более полную физическую картину процесса столкновения.

Данная статья посвящена разработке упрощенных динамических моделей судов в процессе их столкновения с учетом сопротивления забортной воды и оценке влияния сопротивления на значение кинематических параметров судов.

### 1. Постановка задачи

Для исследования движения судов в динамическом процессе их соударения сформулирована модельная задача, в которой анализируется процесс абсолютно неупругого торцевого удара таранящего судна в середину изначально неподвижного таранимого судна (рис. 1).

Модель таранящего судна представлена стержнем переменного сечения и массы, модель таранимого судна представлена призматической балкой прямоугольного профиля. Длина и ширина модели таранимого судна обозначены на рис. 1 как  $L$  и  $B$  соответственно; длина и ширина модели таранящего судна – как  $L_s$  и  $B_s$ .

До соударения таранимое судно неподвижно, таранящее судно обладает начальной скоростью  $v_0$ . В процессе удара таранимое судно приходит в движение и совершает колебания в поперечном направлении. В данной модели соударения судов выражение для контактной силы внедрения, воспринимаемой таранимым судном в процессе удара, было аппроксимировано по результатам численных расчетов, выполненных в работах [7, 8]. В течение и по окончании процесса внедрения таранящего судна в таранимое, суда совершают совместное движение.

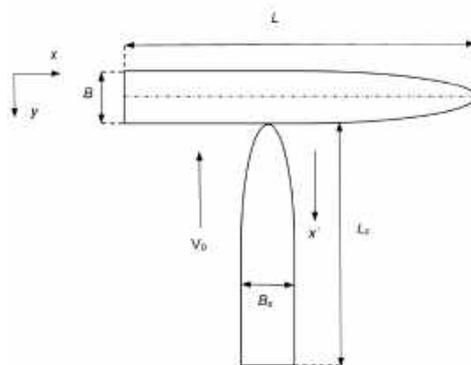


Рис. 1. Схема столкновения судов

Для анализа влияния забортной воды на динамический процесс столкновения судов использовались учет присоединенной массы таранимого судна [9] и погонной динамической силы сопротивления [9, 10].

### 2. Математическая модель задачи

Уравнение движения таранящего судна как стержня из упругопластического материала в продольных перемещениях  $u(x', t)$ :

$$\frac{1}{\rho_r \cdot S_r} \cdot \frac{\partial(\sigma \cdot S_r)}{\partial x'} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где  $x'$  – абсцисса поперечного сечения стержня;  $\rho_r$  – плотность материала стержня;  $S_r(x')$  – площадь поперечного сечения стержневой модели;  $\sigma$  – напряжение в стержне. Начальные и граничные условия таранящего судна:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(x', 0) = v_0, \\ u(x', 0) = 0. \end{cases}, \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение движения свободно плавающего таранимого судна как упругопластической балки с прогибом  $w(x, t)$ :

$$\frac{1}{\rho_b \cdot S_b} \cdot \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (3)$$

где  $x$  – абсцисса поперечного сечения балки;  $\rho_b$  – плотность материала балки;  $S_b(x)$  – площадь поперечного сечения балочной модели;  $M(x)$  – момент внутренних усилий; действующий в поперечном сечении балки.

Начальные и граничные условия таранимого судна имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{w}(x, t)|_{t=0} = 0; \\ w''(x, t)|_{x=0} = 0; w''(x, t)|_{x=L} = 0; \\ w'''(x, t)|_{x=0} = 0; w'''(x, t)|_{x=L} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

При анализе поведения контактной зоны с учетом внедрения стержневой модели судна, контактная сила, действующая на стержневую модель со стороны балочной, будет изменяться по следующему закону:

$$F_c = \begin{cases} k_f \cdot (w(l,t) - u(0,t)), (\dot{w}(l,t) - \dot{u}(0,t)) > 0 \\ 0, \dot{w}(l,t) - \dot{u}(0,t) \leq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $l$  – координата точки контакта. Величина  $k_f = 4$  МН/м получена с помощью линеаризации результатов, представленных в [7, 8].

При моделировании динамического процесса столкновения в сжимаемой жидкости, таранимое судно представлено цилиндрической балкой (рис. 2), полупогруженной в воду, с эквивалентным радиусом

$$R_0 = \sqrt{2 \cdot Ms / (\pi \cdot \rho_0)}, \quad \text{где } Ms = D/L - \text{погонная}$$

масса таранимого судна;  $D$  – водоизмещение таранимого судна;  $\rho_0$  – плотность воды. Сила сопротивления забортной воды определяется по законам динамики движения твердых тел в жидкости [9, 10]. В данном случае вода моделируется как акустическая среда: давление излучения линейно зависит от плотности жидкости.

Для абсолютно твердого кругового цилиндра, полностью погруженного в воду, в полярных координатах  $x = R \cdot \cos\theta$ ,  $y = R \cdot \sin\theta$  задача формулируется следующим образом: при смещении цилиндра с заданной скоростью  $v_c(t)$  в жидкости формируется давление, которое удовлетворяет волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} = \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (6)$$

где  $a_0$  – скорость распространения звука в жидкости.

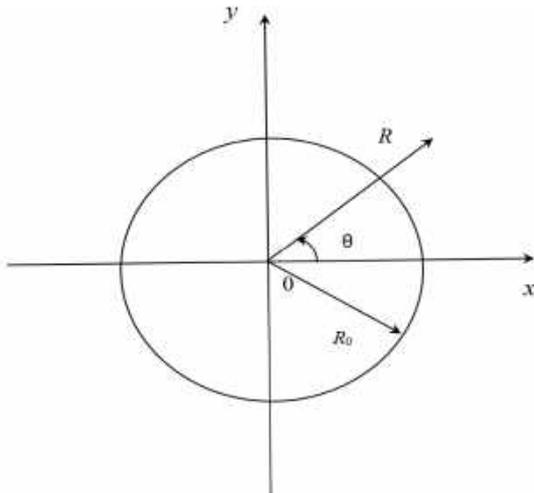


Рис 2. Схема поперечного сечения таранимого судна

На границе контакта цилиндра с жидкостью ставится условие непротекания (совместного движения цилиндра и жидкости):

$$\frac{\partial p}{\partial R} \Big|_{R=R_0} = -\rho_0 \dot{w}(t) \cos\theta, \quad (7)$$

Линейное уравнение состояния воды:

$$p = -\rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (8)$$

где  $\varphi$  – потенциал скорости жидкости.

Если цилиндрическое твердое тело окружено безграничной жидкостью, то при  $R \rightarrow \infty$  :

$$p \rightarrow 0; \varphi \rightarrow 0; \frac{\partial p}{\partial R} \Big|_{R \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (9)$$

В начальный момент времени  $t = 0$ :

$$p(R, \theta, t) \Big|_{t=0} = \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (10)$$

Способом решения сформулированной задачи является метод неполного разделения переменных [11]. В данном решении получено выражение для излучения давления на границе цилиндра:

$$p(R, \theta, t) = -\rho_0 \int_0^t \ddot{w}(t-\tau) \psi_1(\tau) d\tau \cos\theta \quad (11)$$

где  $\psi_1(\tau)$  – переходная функция процесса, равная:

$$\psi_1(t) = -\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} -\frac{K_1 \left( \frac{sR}{a_0} \right)}{s - K_1 \left( \frac{sR}{a_0} \right)} e^{st} ds. \quad (12)$$

На рисунке 3 изображены графики наиболее известных и используемых аппроксимаций переходной функции  $\psi_1(t)$  в отечественной научной литературе [9, 10, 12] для расчета давления со стороны жидкости на деформируемое твердое тело при его движении.

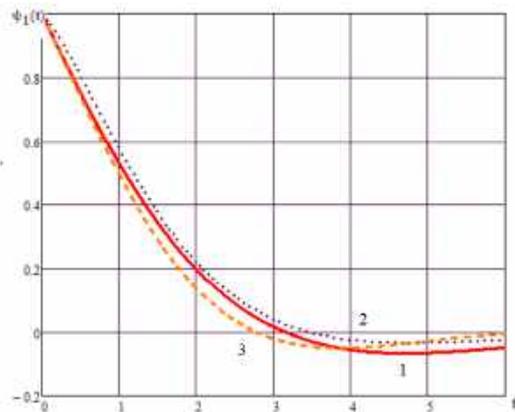


Рис. 3. Переходные функции при  $n = 1$  (кривые 1, 2); переходная функция при  $n = 1$ ,  $t = 0$  (кривая 3)

Аппроксимация  $\psi_1(t)$  [12]:

$$\psi_1(t) = (1,212 \cdot \cos(0,5 \cdot t) + 0,189 \cdot \sin(0,5 \cdot t)) e^{-0,644t} - 0,212 e^{-2t}. \quad (13)$$

Аппроксимация  $\psi_1(t)$  по формуле Миронова [9, 10]:

$$\psi_1(t) = e^{-0,5t} \cos(0,5 \cdot t). \quad (14)$$

Аппроксимация  $\psi_{01}(t)$  по формуле Федоровича [12]:

$$\psi_{01}(t) = e^{-0,5t} J_0 \left( t \sqrt{\frac{3}{4}} \right). \quad (15)$$

Погрешность при сравнении результатов построения кривых трех различных аппроксимаций, в среднем, составляет 3 %.

В данной работе для вычисления погонной динамической силы сопротивления забортной воды на балочную модель таранимого судна, полупогруженного в жидкость, использована акустическая аппроксимация по формуле Миронова [9, 10].

Сила сопротивления [9, 10], действующая в сечении  $x$ , определяется по формуле (16):

$$F_s(x, t) = 0,5\pi \cdot R_0 \cdot \rho_0 \cdot a_0 \cdot \int_0^t \ddot{w}(x, \tau) e^{-\frac{(t-\tau)a_0}{2R_0}} \cdot \cos\left(\frac{(t-\tau)a_0}{2R_0}\right) d\tau. \quad (16)$$

Решение задачи осуществляется использованием численного конечно-разностного метода [13, 14].

Результаты численного расчета задачи соударения балки и стержня приведены для материала подчиняющегося закону линейного упругости для случая одноосного растяжения. Расчет напряженно-деформированного состояния стержня и балки осуществляется по теории пластического течения [15] с учетом разгрузки материала.

### 3. Анализ расчетных результатов

Расчет глубины внедрения таранящего судна в таранимое по модели соударения без учета влияния воды определяется в результате решения уравнений с начальными и краевыми условиями (1), (2) и (3), (4). Результаты расчетов отражены на рис. 4 (кривые 1, 2). Дополнительно рассматривается вариант моделирования столкновения балки и стержня, в котором, в виду продольной жесткости стержня, его упругопластическими свойствами при внедрении в балку можно пренебречь (кривая 1). Глубина внедрения отнесена к ширине таранимого судна  $B$ , время отнесено к величине  $R_0/a_0$ :  $t^* = a_0 t / R_0$ .

Расчет глубины внедрения таранящего судна в таранимое по модели соударения с учетом влияния забортной воды определяется в результате решений уравнений движения балки в идеальной сжимаемой в акустическом приближении (17) и в несжимаемой жидкости (18):

$$\rho_b \cdot S_b \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + F_s(x, t) = 0, \quad (17)$$

$$(\rho_b \cdot S_b + M_w) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = 0. \quad (18)$$

с начальными и краевыми условиями (4).

В уравнении (18)  $M_w$  соответствует присоединенной массе каждого элемента сечения балки [9, 16].

Начальная скорость соударения  $V_0 = 4$  м/с.

Из результатов расчетов следует, что учет сопротивления забортной воды, при моделировании таранимого судна призматической балкой со свободными концами, способствует большим повреждениям при таране.

На рис. 5-7 изображены графические результаты изменения скоростей элементов балки и стержня без учета влияния сопротивления забортной воды (рис. 5) и с учетом сопротивления забортной воды как идеальной, сжимаемой в акустическом приближении, жидкости (рис. 6). На рис. 7 представлены результаты, аналогичные рис. 6, с учетом воды как идеальной несжимаемой жидкости [9, 16]. В численных расчетах использованы относительные величины: скорости элементов балки и стержня отнесены к начальной скорости  $v_0$ .

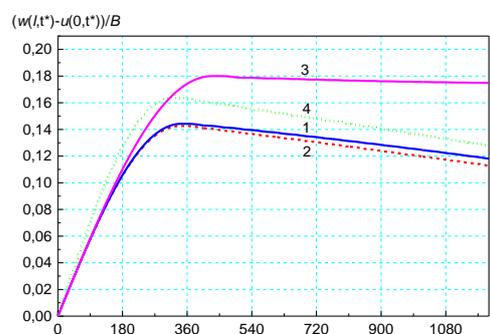


Рис. 4. Глубина внедрения:

- 1 - абсолютно жесткого стержня в упругопластическую балку, 2 – упругопластического стержня в упругопластическую балку. Глубина внедрения с учетом забортной влияния воды – 3 – упругопластического стержня в упругопластическую балку по уравнению (17), 4 – упругопластического стержня в упругопластическую балку по уравнению (18)

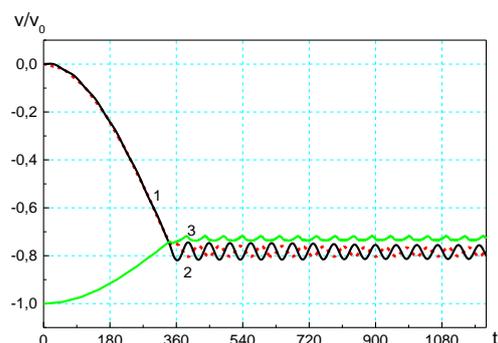


Рис. 5. Изменения скоростей элементов балки и стержня при отсутствии влияния забортной воды на процесс столкновения:

- 1 – изменение скорости элемента свободного конца балки; 2 – изменение скорости срединного элемента балки; 3 – изменение скорости элемента стержня, контактирующего с балкой

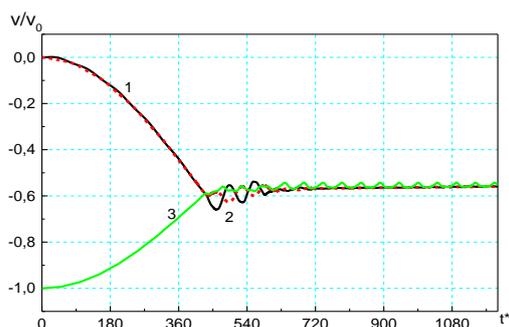


Рис. 6. Изменения скоростей элементов балки и стержня с учетом влияния забортной воды, как сжимаемой жидкости, на процесс столкновения:

1 – изменение скорости элемента свободного конца балки; 2 – изменение скорости срединного элемента балки; 3 – изменение скорости элемента стержня, контактирующего с балкой

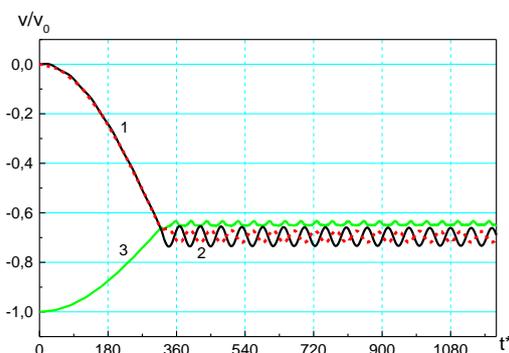


Рис. 7. Изменения скоростей элементов балки и стержня с учетом влияния забортной воды, как несжимаемой жидкости, на процесс столкновения:

1 – изменение скорости элемента свободного конца балки; 2 – изменение скорости срединного элемента балки; 3 – изменение скорости элемента стержня, контактирующего с балкой

Из приведенных результатов изменения скоростей элементов балки и стержня следует, что при учете сопротивления забортной воды на динамический процесс столкновения, как идеальной сжимаемой в акустическом приближении жидкости, скорость движения контактной зоны на 14,5 % меньше, по сравнению с вариантом идеальной несжимаемой жидкости.

На рис. 8 представлены результаты расчетов относительной кинетической энергии моделей судов и работы силы сопротивления забортной воды при перемещении судов в процессе столкновения (суммарная кинетическая энергия моделей судов и работа силы сопротивления воды отнесены к начальной кинетической энергии модели таранящего судна  $E_{к0}$ ). Кривая 1 на рис. 8 соответствует относительной разности (под которой понимается энергия системы) между первоначальной кинетической энергией модели таранящего судна и

работой силы сопротивления воды при движении модели таранящего судна.

При сравнении двух вариантов моделирования влияния забортной воды на динамический процесс столкновения, следует, что при учете подвижности таранящего судна и силы сопротивления воды, как идеальной, сжимаемой в акустическом приближении жидкости, 16 % кинетической энергии таранящего судна переходит в воду. При сравнении вариантов учета сопротивления воды, потери суммарной кинетической энергии балочной и стержневой моделей судов на 22 % меньше при моделировании присоединенной массы таранящего судна, чем при расчете динамической силы сопротивления воды, зависящей от движения таранящего судна.

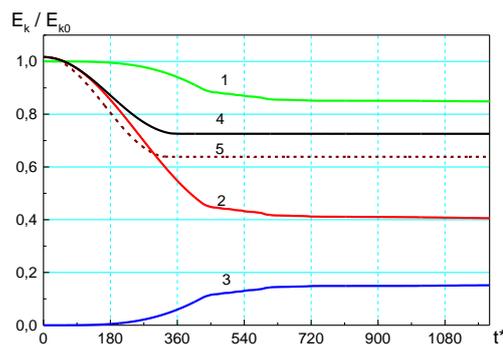


Рис. 8. Энергия системы (кривая 1), суммарная кинетическая энергия (кривая 2), работа силы сопротивления воды (кривая 3), суммарная кинетическая энергия при столкновении без учета влияния воды (кривая 4), суммарная кинетическая энергия с учетом сопротивления воды как несжимаемой жидкости (кривая 5)

### Закключение

Представлен метод расчёта для построения динамических моделей судов на основе теории балок и стержней в одномерном приближении и линейной модели взаимодействия таранящего судна с водной средой при небольших скоростях соударения. Анализ влияния забортной воды на движение соударяемых моделей судов проведен с помощью аналитических методов гидроупругости

Приведены результаты изменения скоростей судов после соударения с учетом и отсутствием сопротивления со стороны воды. Приведены результаты влияния работы силы сопротивления воды на изменение кинетической энергии системы. Продемонстрировано изменение глубины внедрения таранящего судна при различных математических моделях динамического процесса соударения судов.

По результатам расчетов продемонстрированы глубины внедрения таранящего судна в таранимое при учете сопротивления воды. Установлены изменения кинетической энергии столкнувшихся судов и работы силы сопротивления воды. При использовании воды как сжимаемой в акустическом приближении жидкости получены наибольшие потери суммарной кинетической энергии судов при столкновении.

### Литература

1. Норвежский фрегат после столкновения с танкером ушел под воду, 08.11.2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.interfax.ru/world/637685>
2. Разведывательный корабль Лиман затонул после столкновения, 27.04.2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/news/2017/04/27/sunk/>
3. Statistics of Marine Accidents. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics\\_mar.html](http://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics_mar.html)
4. Лепп Ю. Ф. Учет энергопоглощающей способности борта крупнотоннажных танкеров при столкновении. «Вопросы судостроения», серия «Проектирование судов», 1978г., вып. 17, стр. 115 – 120.
5. Нестеров А. Б. Проблемы обеспечения безопасности судов при навигационных авариях за счет регламентации размеров конструктивных элементов корпуса. - Судостроение № 4, СПб, 2004 (в соавторстве с Апполоновым Е. М.).
6. Minorsky V. U. An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants. Journal of ship research. 1959, № 8.
7. Васильев Р. В., Родионов А. А. «Оценка критериев разрушения судовых конструкций при численном моделировании столкновения судов» «Морские интеллектуальные технологии». № 4 (14) 2011г. с.7 – 15.
8. Родионов А. А. Го Цзюнь «Исследование проблем предельной прочности корпусных конструкций при повреждениях от столкновения судов» «Морские интеллектуальные технологии». № 1(7) 2010г. с.13 – 25.
9. Замышляев Б. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л., «Судостроение», 1967. – 388 с.
10. Григолюк Э. И., Горшков А. Г. Нестационарная гидроупругость оболочек. Л., «Судостроение», 1974. – 207с.
11. Кошляков Н.С. и др. Уравнения в частных производных математической физики. М.: ВШ, 1970. -720 с.
12. Перцев А. К., Кадыров С. Г. Воздействие подводного взрыва на элементы корабля. М – во образования и науки Рос. Федерации, С. – Петерб. гос. мор. техн. ун-т – Санкт – Петербург: СПбГМТУ, 2009. – 320 с.
13. Бабкин А. В., Колпаков В. И., Охитин В. Н., Селиванов В. В. Прикладная механика сплошных сред: Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: Том 3. М. МГТУ 2005. – 518 с.
14. Родионов А.А., Карпенко Е.А. (2020) Исследование динамического процесса удара круговых цилиндров об абсолютно жесткую преграду. Морские интеллектуальные технологии, № 4(50), Т.3, С.11 – 17.
15. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. – 420 с.
16. Симаков Г. В., Марченко Д. В., Шхинек К. Н. Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия судов с преградами. Л.: ЛГУ, 1979. – 183 с.

### References

1. Norvezhskij fregat posle stolknoveniya s tankerom ushel pod vodu [Norwegian frigate sank after collision with tanker], 08.11.2018. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.interfax.ru/world/637685>
2. Razvedyvatel'nyj korabl' Liman zatonul posle stolknoveniya [Spy ship "Liman" has sunk after collision], 27.04.2017. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://lenta.ru/news/2017/04/27/sunk/>
3. Statistics of Marine Accidents. [Elektronnyj resurs]. URL: [http://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics\\_mar.html](http://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics_mar.html)
4. Lepp YU. F. Uchet energopogloshchayushchej sposobnosti borta krupnotonnazhnyh tankerov pri stolknovenii. «Voprosy sudostroeniya», seriya «Proektirovanie sudov» [Accounting for the energy-absorbing capacity of the side of large-tonnage tankers in the event of a collision. ], 1978, vyp. 17, pp. 115 – 120.
5. Nesterov A. B. Problemy obespecheniya bezopasnosti sudov pri navigacionnyh avariyah za schet reglamentacii razmerov konstruktivnyh elementov korpusa. - Sudostroenie № 4, SPb, 2004 (v soavtorstve s Appolonovym E. M.) [Problems of ensuring the safety of ships in navigational accidents due to the regulation of the dimensions of the structural elements of the ship's hull. - Shipbuilding No. 4, St. Petersburg, 2004 (co-authored with E. M. Appolonov)].
6. Minorsky V. U. An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants. Journal of ship research. 1959, № 8.
7. Vasil'ev R. V., Rodionov A. A. «Ocenka kriteriev razrusheniya sudovyh konstrukcij pri chislennom modeliro-vanii stolknoveniya sudov» «Morskie intellektual'nye tekhnologii» [Evaluation of the criteria for the destruction of ship structures in the numerical simulation of a collision of ships "Marine Intellectual Technologies"]. № 4 (14) 2011, pp.7 – 15.
8. Rodionov A. A. Go Czyun' «Issledovanie problem predel'noj prochnosti korpusnyh konstrukcij pri povre-zhdeniyah ot stolknoveniya sudov» «Morskie intellektual'nye tekhnologii» [Investigation of the problems of the ultimate strength of hull structures in case of damage from the collision of ships "Marine Intellectual Technologies"]. № 1(7) 2010. pp.13 – 25.
9. Zamyshlyayev B. V., Yakovlev YU. S. Dinamicheskie nagruzki pri podvodnom vzryve. L., «Sudostroenie» [Dynamic loads during underwater explosion], 1967. – 388 p.
10. Grigolyuk E. I., Gorshkov A. G. Nestacionarnaya gidrouprugost' obolochek. L., «Sudostroenie» [Unsteady Hydroelasticity of Shells] 1974. – 207 p.
11. Koshlyakov N.S. i dr. Uravneniya v chastnyh proizvodnyh matematicheskoy fiziki. [Koshlyakov N.S. et al. Equations in partial derivatives of mathematical physics. M., HS] M.: VSH, 1970. -720 p.
12. Percev A. K., Kadyrov S. G. Vozdejstvie podvodnogo vzryva na elementy korablya. M – vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, S. – Peterb. gos. mor. tekhn. un-t – Sankt – Peterburg: SPbGMTU [The impact of an underwater explosion on the ship's elements. Ministry of Education and Science Rus. Federation, S. - Petersburg. State Marine Technical University: SMTU], 2009. – 320 p.

13. Babkin A. V., Kolpakov V. I., Ohitin V. N., Selivanov V. V. Prikladnaya mekhanika sploshnyh sred: CHislennye metody v zadachah fiziki bystroprotekayushchih processov: Tom 3. M. MGТУ [Applied Continuum Mechanics: Numerical Methods in Problems in the Physics of Fast Processes: Vol. 3. M. BMSTU] 2005. – 518 p.
14. Rodionov A.A., Karpenko E.A. (2020) Issledovanie dinamicheskogo processa udara krugovyh cilindrov ob absolutno zhestkuyu pregradu. Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 4(50), T.3 [Research on the dynamics of impact of elastic-plastic cylindrical rod against an absolutely rigid barrier, Marine Intellectual Technologies, № 4(50), Vol. 3], pp.11 – 17.
15. Kachanov L. M. Osnovy teorii plastichnosti. M.: Nauka [Fundamentals of the theory of plasticity], 1969. – 420 p.
16. Simakov G. V., Marchenko D. V., Shkhinek K. N. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya vzaimodej-stviya sudov s pregradami [Theoretical and experimental studies of the interaction of ships with barriers]. L.: LGU, 1979. – 183 p.

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

**Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

**Alexander A. Rodionov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, head of department of ship mechanics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

**Евгения Алексеевна Карпенко**, магистрант кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: evgeniakapenko@gmail.com

**Evgeniya A. Karpenko**, Master student of department of ship mechanics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: evgeniakapenko@gmail.com

**Владимир Александрович Коршунов**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

**Vladimir A. Korshunov**, Ph. D. (Eng.), associate professor of department of ship mechanics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.02.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 03.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2022.

## ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Научная статья

УДК 621.923

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.011>

#### Динамика вибрационных воздействий на шлифовальный станок в условиях плавучей мастерской с учетом морского волнения

Е.А. Владецкая<sup>1</sup> vladetska@gmail.com, С.М. Братан<sup>2</sup> serg.bratan@gmail.com, А.О. Харченко<sup>2</sup> khao@list.ru,  
Е.В. Хекерт<sup>1</sup> zur\_mga@nsma.ru

<sup>1</sup>Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, <sup>2</sup>Севастопольский государственный университет

**Аннотация.** В статье приведены результаты анализа и теоретических исследований динамики вибрационных воздействий на шлифовальный станок с учетом изменяющихся внешних факторов в условиях плавучей мастерской. Для обеспечения заданных параметров качества поверхностей при шлифовании на оборудовании плавучей мастерской на основе полученных динамических моделей и оценок разработана автоматическая система стабилизации параметров технологической системы с учетом воздействий внешней среды, в частности, волнений водной поверхности. Для процесса шлифования на основе принципа Даламбера–Лагранжа построено математическое описание, характеризующее динамику перемещений центров масс инструмента и заготовки с учетом изменения фактической глубины резания, в виде системы дифференциальных уравнений. Для моделирования процесса экспериментально определены коэффициенты жесткости и демпфирования. Для оценки фактической глубины резания разработана расширенная модель объекта с построением формирующего фильтра – динамического звена, моделирующего динамику вибрационных воздействий на станок от внешней среды через основание плавучей мастерской. Полученные векторно-матричные уравнения представляют стандартную форму описания динамической системы в терминах теории пространства состояний, что позволяет её использовать для исследования характеристик и поведения процесса, а также для синтеза систем управления этим процессом. Примеры численных характеристик работы фильтра и их анализ показывают, что через 0,4 секунды наблюдатель переходит в установившийся режим с готовностью к практическому использованию. Построенный формирующий фильтр характеризует динамику отклонений шлифовального круга и обрабатываемой заготовки при внешних воздействиях, что позволит существенно повысить качество изготовления деталей в условиях плавучей мастерской.

**Ключевые слова:** плавучая мастерская, шлифовальный станок, динамическая система, вибрационные воздействия, внешние возмущения, морское волнение, автоматическая система стабилизации параметров, расширенная модель объекта, векторно-матричные уравнения, наблюдатель, формирующий фильтр, характеристики работы фильтра.

**Для цитирования:** Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Хекерт Е.В. Динамика вибрационных воздействий на шлифовальный станок в условиях плавучей мастерской с учетом морского волнения, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 84—93.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.011>

#### Dynamics of vibration effects on a grinding machine in a floating workshop, taking into account sea waves

Ekaterina A. Vladetskaya<sup>1</sup> vladetska@gmail.com, Sergey M. Bratan<sup>2</sup> serg.bratan@gmail.com,  
Alexander O. Kharchenko<sup>2</sup>, khao@list.ru, Evgeniy V. Hekert<sup>1</sup> zur\_mga@nsma.ru

<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University, <sup>2</sup>Sevastopol State University

**Abstract.** The article presents the results of analysis and theoretical studies of the dynamics of vibration effects on a grinding machine, taking into account changing external factors in a floating workshop. To ensure the specified parameters of the quality of surfaces when grinding on the equipment of a floating workshop, on the basis of the obtained dynamic models and estimates, an automatic system for stabilizing the parameters of the technological system has been developed, taking into account the effects of the external environment, in particular, the waves of the water surface. For the grinding process on the basis of the d'Alembert – Lagrange principle, a mathematical description is built that characterizes the dynamics of displacements of the centers of mass of the tool and workpiece, taking into account the change in the actual cutting depth, in the form of a system of differential equations. To simulate the process, the stiffness and damping coefficients are experimentally determined. To assess the actual cutting depth, an extended model of the object has been developed with the construction of a shaping filter - a dynamic link that simulates the

dynamics of vibration effects on the machine from the external environment through the base of the floating workshop. The resulting vector-matrix equations represent the standard form of describing a dynamical system in terms of state space theory, which allows it to be used to study the characteristics and behavior of a process, as well as to synthesize control systems for this process. Examples of the numerical characteristics of the filter operation and their analysis show that in 0.4 seconds the observer goes into a steady state with readiness for practical use. The constructed shaping filter characterizes the dynamics of deviations of the grinding wheel and the workpiece being processed under external influences, which will significantly improve the quality of parts manufacturing in a floating workshop.

**Keywords:** floating workshop, grinding machine, dynamic system, vibration effects, external disturbances, sea waves, automatic parameter stabilization system, extended object model, vector-matrix equations, observer, forming a filter, filter performance characteristics.

**For citation:** Ekaterina A. Vladetskaya, Sergey M. Bratan, Alexander O. Kharchenko, Evgeniy V. Hekert, Dynamics of vibration effects on a grinding machine in a floating workshop, taking into account sea waves, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 84—93.

## Введение

Для промышленности приморских городов, в которых базируется флот, характерно наличие плавучих мастерских (ПМ) и рейдовых мастерских (ПМР), на палубах которых размещены производственные механообрабатывающие участки. Их станочное оборудование включает широкий перечень, в том числе высокоточные шлифовальные станки. Особенностью эксплуатации указанного оборудования на механообрабатывающих участках ПМ и ПМР является наличие вибраций, снижающих точность обработки и повышающих шероховатость обрабатываемых поверхностей.

Нестабильность параметров обрабатываемых деталей определяется воздействием в процессе их производства на технологическую систему (ТС) изменяющихся внешних факторов, часть из которых является трудно контролируемой. Такая проблема весьма актуальна для работы любых высокоточных станков в условиях ПМ и ПМР.

В работе [1] рассмотрен процесс влияния возмущений на технологическую систему металлорежущего станка в ПМР, проведен анализ воздействия возмущающих сил ветра, течения и морского волнения на плавучее основание.

### Система стабилизации параметров технологической системы с учетом воздействий внешней среды

На основе системного подхода предложена структура операции, сформулированы основные положения и методы анализа процесса; определены входные, выходные переменные и параметры состояния каждой из подсистем. Установлено, что параметры технологической системы могут изменяться с течением времени предсказуемым и непредсказуемым образом под действием различных факторов. Решение задачи по оценке неизменяемых параметров может быть обеспечено применением подхода, основанного на использовании схем со «стохастическим наблюдателем». При этом оценка неизменяемых компонент производится по результатам моделирования динамики с входным сигналом управления, поступающим на реальный динамический объект – технологическую систему [2].

Для учета влияния статистических свойств текущих отклонений радиус-векторов шлифовального круга и заготовки необходимо дополнительно к входному сигналу подавать на вход модели системы случайный процесс со стохастическими характеристиками, как у текущего

отклонения радиус-вектора шлифовального круга. Случайный входной сигнал получают при помощи формирующего фильтра. Выходная координата формирующего фильтра по своим статистическим параметрам соответствует параметрам компонент динамической системы, характеризующей процессы воздействия шлифовального круга на заготовку.

Для обеспечения заданных параметров качества поверхностей при шлифовании на оборудовании плавучей мастерской на основе полученных динамических моделей и оценок разработана автоматическая система (рисунок 1) стабилизации параметров технологической системы с учетом воздействий внешней среды, в частности, волнений водной поверхности.

Настройка формирующего фильтра проводится с использованием результатов статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга. Такая схема носит название «динамического наблюдателя». Однако с течением времени значения переменных и их оценок наблюдателем неизбежно расходятся вследствие различных факторов и отличий действительных значений отклонений радиус-векторов от их моделей. При этом целесообразно применение блока подстройки состояний наблюдателя в форме фильтра Калмана-Бюсси, осуществляющего требуемую коррекцию входных сигналов с обеспечением минимально возможного значения среднеквадратического отклонения.

Полученные при этом оценки имеют наименьшую из возможных дисперсию (при условии гауссовских шумов измерений). Они пригодны для использования в системах управления по величине отклонения измеряемого параметра. Такая система должна стабилизировать режимы относительно задаваемых условиями граничного технологического цикла с минимально допустимыми запасами. Также она должна учитывать шумы от таких воздействий внешней среды, как волнение водной поверхности, передаваемое через плавучее основание и палубу плавучей мастерской технологическому оборудованию.

Следовательно, для решения проблемы обеспечения заданных параметров качества поверхностей при шлифовании на оборудовании плавучей мастерской необходимо на основе полученных динамических моделей и оценок разработать автоматическую систему. Система должна обеспечить стабилизацию динамических параметров с учетом воздействий волнений водной поверхности на плавучее основание.

**Синтез модели процесса шлифования с учетом динамики вибрационных воздействий на станок от морского волнения через плавучее основание**

Для моделирования взаимодействия шлифовального круга и заготовки в процессе обработки представим его математическое описание.

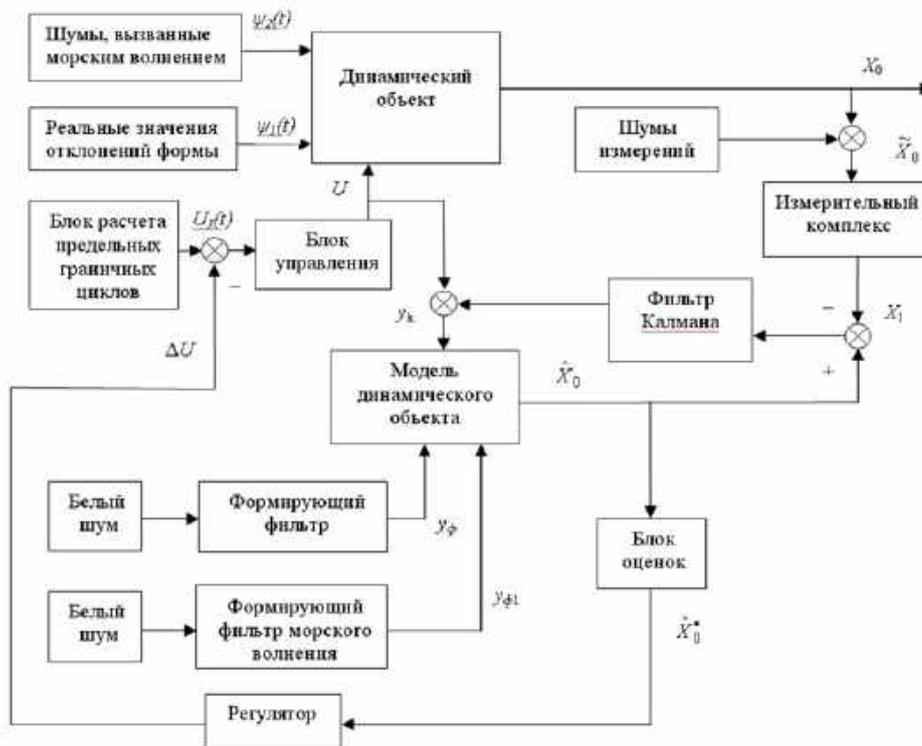


Рис. 1. Система управления для реализации процесса шлифования в условиях ПМ с учетом воздействий внешней среды:  $\psi_1(t)$  – реальные значения отклонений формы;  $\psi_2(t)$  – шумы от воздействий морского волнения;  $U$  – вектор управляющих воздействий, связанный с радиальной подачей;  $\Delta U$  – коррекция ошибки с пропорционального регулятора;  $U_3(t)$  – заданное воздействие;  $X_0$  – выходной параметр объекта (фактическая глубина резания);  $\tilde{X}_0$  – измеренный выходной параметр с шумами;  $X_1$  – данные измерений;  $\dot{X}_0$  – производная от выходного фактического параметра;  $\hat{X}_0$  – оценка вектора параметра состояний;  $u_\phi$  – выходной параметр формирующего фильтра, моделирующего отклонение формы;  $u_{\phi 1}$  – выходной параметр формирующего фильтра, моделирующего морское волнение;  $u_k$  – выходной параметр с фильтра Калмана на динамическую модель объекта

Это взаимодействие в первую очередь характеризуется параметрами формы инструмента и заготовки, их взаимоположением, упругими, демпфирующими и другими свойствами технологической системы [3]. В качестве математической модели шлифовального круга может использоваться вращающийся диск, а при ее одномерном представлении – вращающаяся окружность. Центр вращения неизбежно не совпадает с центром формы, что и определяет дисбаланс круга, которым обычно и объясняют появление периодически изменяющихся сил, возникающих при шлифовании. В условиях ПМ появляются дополнительные возмущения вследствие воздействий морского волнения через плавучее основание на ТС станка. Кроме того, поверхность круга не имеет идеальной геометрии. Обнаруживаются закономерные и случайные отклонения формы, а также волнистость, амплитуда, частота и фаза которой изменяются за период стойкости инструмента.

Для процесса шлифования на основе принципа Даламбера–Лагранжа построено математическое описание, характеризующее динамику перемещений центров масс инструмента и заготовки с учетом изменения фактической глубины резания, в виде системы дифференциальных уравнений [4]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3 \dot{t}_f + c_3 t_f - h_1 \dot{S} - c_1 S = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 - h_3 \dot{t}_f - c_3 t_f = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $m_1, m_2$  – приведенные массы заготовки с центрами и инструмента;  $h_i$  и  $c_i$  – коэффициенты скоростного сопротивления (демпфирования) и коэффициент жесткости  $i$ -го звена соответственно;  $x_1$  – координата центра шлифовального круга;  $x_2$  – координата центра вращения заготовки;  $S$  – путь,

пройденный механизмом подачи за время  $t$ ;  $t_f$  – фактическая глубина резания.

Фактическая глубина резания, определяется как

$$t_f = R + r - L, \quad (2)$$

где  $R = R_0 + \Delta R$  – текущее значение радиуса инструмента с учетом его износа  $\Delta R$ ;  $r = r_0 + \Delta r$  – текущий радиус-вектор заготовки с учетом съема материала и отклонений формы  $\Delta r$ ;  $L = L_0 + \Delta L = L_0 + x_2 - x_1$  – текущее расстояние между центрами вращения инструмента и заготовки.

С учетом полученного определения  $t_f$  и ее составляющих элементов система (1) запишется:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 (\dot{x}_1 - \dot{S}) + h_3 (\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r} - \dot{x}_2 + \dot{x}_1) + c_1 (x_1 - S) + c_3 (R_0 + \Delta R + r_0 + \Delta r - L_0 - x_2 + x_1) = 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 - h_3 (\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r} - \dot{x}_2 + \dot{x}_1) - c_3 (R_0 + \Delta R + r_0 + \Delta r - L_0 - x_2 + x_1) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для исходного положения заготовки в момент начала её контакта с инструментом ( $L_0 = R_0 + r_0$ ;  $S_0 = 0$ ;  $x_{10} = 0$ ;  $x_{20} = 0$ ;  $t_f = 0$ ) система уравнений (3) в отклонениях запишется:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3 (\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) + c_3 (x_1 + \Delta R) - h_3 (\dot{x}_2 - \Delta \dot{r}) - c_3 (x_2 - \Delta r) - h_1 \dot{S} - c_1 S = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 + h_3 (\dot{x}_2 - \Delta \dot{r}) + c_3 (x_2 - \Delta r) - h_3 (\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) - c_3 (x_1 + \Delta R) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

При работе оборудования в условиях ПМ вариации геометрических размеров инструмента и заготовки имеют периодический или почти периодический характер, что и объясняется воздействием возбуждающих сил, вызванных вибрациями от морского волнения и отклонениями формы круга, в существенной степени определяющих динамику процесса шлифования. Модель (4) служит основой для анализа динамики отклонения процесса взаимодействия инструмента с заготовкой от номинального режима.

Для моделирования процесса экспериментально определены коэффициенты жесткости и демпфирования (табл.1).

При определении статической жесткости технологической системы заготовку устанавливали в тензометрические центры и вводили в контакт с инструментом. С помощью поперечной подачи выполняли предварительное нагружение путем постепенного воздействия инструмента на заготовку.

Затем выполняли контрольное нагружение и разгружение системы. По показаниям усилителя определяли величину нагружения и разгружения, а соответствующие им перемещения в системе определяли по показаниям датчика линейных перемещений. Полученные экспериментальные данные обрабатывали по методу наименьших квадратов. Коэффициент демпфирования вычисляли по логарифмическому декременту затуханий по методике [5]. Параметры масс выбраны

из технических характеристик станков и определены путем взвешивания заготовки и инструмента.

Графики зависимостей для отклонений положения инструмента  $x_1$ , заготовки  $x_2$  и глубины резания  $t_f$  от номинальных значений приведены на рисунке 2.

Таблица 1  
Экспериментальные значения параметров динамической модели для станков 3В12, ВUA16

№	Наименование	Обозначение	Значение	Мод. станка
1	Коэффициент жесткости системы (инструмент-шпиндель)	$C_1$ Н/м	$(2...5) \cdot 10^7$ $(1...3) \cdot 10^7$	3В12 ВUA16
2	Коэффициент жесткости системы (заготовка-центры)	$C_2$ Н/м	$(4...18) \cdot 10^6$ $9 \cdot 10^8 \dots 15 \cdot 10^7$	3В12 ВUA16
3	Коэффициент статической жесткости контакта круга и заготовки	$C_3$ Н/м	$(2...10) \cdot 10^7$ $7 \cdot 10^8 \dots 10 \cdot 10^7$	3В12 ВUA16
4	Коэффициент демпфирования системы (инструмент-шпиндель)	$h_1$ Н·с/м	$(2,5...5,7) \cdot 10^4$ $(2,1...3,2) \cdot 10^4$	3В12 ВUA16
5	Коэффициент демпфирования системы «заготовка-центры»	$h_2$ Н·с/м	$(0,152...0,257) \cdot 10^3$ $(1,32...3,2) \cdot 10^4$	3В12 ВUA16
6	Коэффициент демпфирования контакта инструмента и заготовки	$h_3$ Н·с/м	$(0,143...0,224) \cdot 10^3$ $(1,15...1,243) \cdot 10^4$	3В12 ВUA16
7	Приведенная масса заготовки (инструмент-шпиндель)	$m_1$ кг	237 150	3В12 ВUA16
8	Приведенная масса (заготовка-центры)	$m_2$ кг	54 15	3В12 ВUA16

Для дальнейшего анализа динамическую систему (4) целесообразно привести к форме:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [-(h_1 + h_3)\dot{x}_1 - (c_1 + c_3)x_1 + h_3\dot{x}_2 + c_3x_2] - \frac{1}{m_1} [h_3(\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r}) + c_3(\Delta R + \Delta r)] + \frac{1}{m_1} [h_1\dot{S} + c_1S], \\ \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} [-(h_2 + h_3)\dot{x}_2 - (c_2 + c_3)x_2 + h_3\dot{x}_1 + c_3x_1] + \frac{1}{m_2} [h_3(\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r}) + c_3(\Delta R + \Delta r)]. \end{cases} \quad (5)$$

Первые слагаемые правых частей соотношений (5) представляют собой компоненты с производными отклонений положения центра вращения инструмента и центра вращения заготовки,

зависящие непосредственно от внутренних обобщенных геометрических и кинематических координат динамической системы. Вторые слагаемые отражают влияние износа круга и отклонений формы заготовки. Третье слагаемое первого уравнения в системе (5) отражает воздействие пути врезания и радиальной подачи инструмента на динамическую систему.

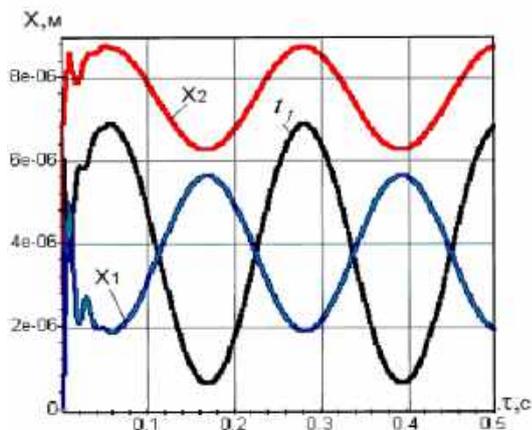


Рис. 2. Графики зависимостей для отклонений положения центра круга  $x_1$ , заготовки  $x_2$  и глубины резания  $t_f$  от номинальных значений

С обозначениями

$$y_1 = x_1, \quad y_2 = \dot{y}_1 = \dot{x}_1, \quad y_3 = x_2, \quad y_4 = \dot{y}_3 = \dot{x}_2$$

система (5) может быть приведена к нормальной форме Коши [6]:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = -\frac{1}{m_1}[(c_1 + c_3)y_1 + (h_1 + h_3)y_2 - c_3y_3 - h_3y_4] - \\ - \frac{1}{m_1}[c_3(\Delta R + \Delta r) + h_3(\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r})] + \frac{1}{m_1}[h_1\dot{S} + c_1S], \\ \dot{y}_3 = y_4, \\ \dot{y}_4 = -\frac{1}{m_2}[(c_2 + c_3)y_3 + (h_2 + h_3)y_4 - c_3y_1 - h_3y_2] + \\ + \frac{1}{m_2}[c_3(\Delta R + \Delta r) + h_3(\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r})], \end{cases}$$

и записана в матричном виде:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot W + C_0 \cdot U. \quad (6)$$

Для решения задач моделирования динамики процесса целесообразно записать соотношение совместно с уравнением наблюдений [1]. При этом система в матричной форме пространства состояний представляется в виде:

$$\begin{cases} \dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot W + C_0 \cdot U; \\ Z_0 = E_0 \cdot Y_0 + F_0 \cdot V_0; \\ T_0 = Q_0 \cdot Z_0. \end{cases} \quad (7)$$

Для оценки фактической глубины резания необходимо разработать расширенную модель объекта. Для этого требуется построение

формирующего фильтра – динамического звена, моделирующего динамику вибрационных воздействий на станок от внешней среды через основание плавучей мастерской.

Для задач синтеза системы автоматического управления и входящих в их состав измерительных подсистем необходимо построение формирующих фильтров, позволяющих получать на выходе процессы с заданными характеристиками. Такие фильтры известными методами могут быть достаточно просто построены для процессов, характеризующихся спектральными плотностями с дробно-рациональным описанием [7]. Аппроксимация спектров двумерного морского волнения, удовлетворяющего указанным требованиям, имеет вид [8]:

$$S_r = \frac{2D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}{w^4 + 2(\alpha^2 - \beta^2)w^2 + (\alpha^2 + \beta^2)}, \quad (8)$$

где  $D_r$  – дисперсия волновой ординаты,  $D_r = 0,143(0,5 \cdot h_{3\%})^2, m^2$ ;  $\alpha = 0,21\beta$ ;  $h_{3\%}$  – высота волны 3 % обеспеченности, м.

Высота волны 3 % обеспеченности определяется степенью морского волнения в соответствии со шкалой ГУ ГМС (Регистра), часть которой для диапазона условий, встречающихся при функционировании плавучей мастерской, приведена в таблице 2.

Таблица 2

Шкала степени морского волнения

Степень волнения	Высота волны, $h_{3\%}, m$	Характеристика волнения
1	0...0,25	Слабое
2	0,25...0,75	Слабое
3	0,75...1,25	Значительное
4	1,25...2,0	Значительное
5	2,0...3,5	Сильное
6	3,5...6,0	Сильное

Параметр  $\beta$  связан с частотой максимума спектра развитого волнения зависимостью:

$$\beta = 0,82\bar{w}_m, \quad (9)$$

где частота максимума спектра  $\bar{w}_m$  определяется соотношением:

$$\bar{w}_m = 1,74h_{3\%}^{+0,4}, \quad (10)$$

что совместно с (8) и (9) позволяет полностью определить спектральную плотность волновой заданной интенсивности для двумерного волнения.

Наиболее точным по существующим представлениям является описание морского волнения суперпозицией волновых систем [5, 8]. Энергетические спектры двумерного и трехмерного волнений связаны соотношением:

$$\int_0^{\infty} S_r(w)dw = \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} S_r(w, \alpha) d\alpha dw, \quad (11)$$

где  $\alpha$  – угол распространения плоской системы волн относительно генерального направления.

Для описания энергетического спектра трехмерного волнения обычно используется формула Артура [8]:

$$S_r(w, \alpha) = \frac{2}{\pi} S_r(w) \cos^2(w), \quad (12)$$

где  $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$ ;  $S_r(w)$  – спектр двумерного волнения типа (9) или (10).

Подстановка (11) в (10) с учетом (8) позволяет записать выражение спектральной плотности морского волнения, действующего на плавучее основание, расположенное под углом  $\chi$  к генеральному направлению бега волн в форме:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_r(w) \cos^2(\alpha) \sin^2(\chi - \alpha) d\alpha \quad (13)$$

где  $(\chi - \alpha)$  – угол между осью плавучего основания и направлением распространения соответствующей плоской системы волн.

Интегрирование в правой части (13) приводит к результату:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \left( \frac{3}{4} \sin^2 \chi + \frac{1}{4} \cos^2 \chi \right) S_r(w), \quad (14)$$

где  $S_r(w)$  – спектральная плотность двумерного морского волнения с описанием вида (8) или (9).

С учетом (14) спектральная плотность морского волнения приобретает форму:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \frac{1 + 2 \sin^2 \chi}{4} \frac{D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}{w^4 + 2(\alpha^2 + \beta^2)w^2 + (\alpha^2 + \beta^2)} \quad (15)$$

Спектральной плотности типа (10) соответствует формирующий фильтр с описанием по Лапласу:

$$\Phi_{\varepsilon\chi}(S) = \frac{\sqrt{(1/2 + \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{S^2 + 2\alpha S + \alpha^2 + \beta^2}, \quad (16)$$

возбуждаемый сигналом типа белого шума.

Углы волнового склона для волн относительно малой амплитуды, к которым относится развитое морское волнение, могут быть определены выражением:

$$\varepsilon = \frac{w^2}{g} r, \quad (17)$$

где  $r$  – радиус волны,  $r = h/2$ .

С учетом (17) формирующий фильтр угла волнового склона приобретает форму:

$$\Phi_{\varepsilon\chi}(S) = \frac{-S^2 \sqrt{(1/2 + \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g(S^2 + 2\alpha S + \alpha^2 + \beta^2)}. \quad (18)$$

При построении формирующих фильтров (14) и (18) для трехмерного морского волнения использован подход, предложенный в работе [5] для определения дисперсии бортовой качки плавучего основания, расположенного лагом к волне, при воздействии двумерного и трехмерного волнений.

В терминах пространства состояния [9] формирующий фильтр угла волнового склона двумерного морского волнения, действующего на плавучее основание, может быть получен на основании (18):

$$\dot{X}_{\phi} = A_{\phi} X_{\phi} + B_{\phi} V; \quad (19)$$

$$\varepsilon_{\chi} = C_{\phi} X_{\phi} + D_{\phi} V, \quad (20)$$

$$\text{где } A_{\phi} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -(\alpha^2 + \beta^2) & -2\alpha \end{pmatrix},$$

$$X_{\phi} = \begin{pmatrix} x_{\phi 1} \\ x_{\phi 2} \end{pmatrix}; \quad B_{\phi} = \begin{pmatrix} 2\alpha \\ \beta^2 - 3\alpha^2 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{(1 + 2 \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g\sqrt{2}};$$

$$C_{\phi} = (1 \ 0); \quad D_{\phi} = \frac{\sqrt{(1 + 2 \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g\sqrt{2}},$$

где  $V$  – белый шум;  $\varepsilon_{\chi}$  – эквивалентный угол волнового склона для двумерного морского волнения;  $\alpha = 0,21\beta$ ,  $\beta = 1,427h_{3\%}$ ,  $\chi$  – угол между диагональной плоскостью плавучего основания и генеральным направлением распространения бега волн;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $D_r$  – дисперсия волновой ординаты;  $h_{3\%}$  – высота волны 3% обеспеченности.

В соответствии с [9] соотношение (18) представляет «сообщение», а выражение (19) – «наблюдение» над динамическим объектом (взволнованной жидкостью).

Согласно гидродинамической теории качки судна на волнении, силы, действующие на плавучее основание, определяются зависимостями [8]:

$$F_{\bar{x}} = -\alpha_{\xi} V p g k r(t); \quad F_{\bar{y}} = -\alpha_{\zeta} V p g k r(t); \quad F_{\bar{z}} = -\alpha_{\varsigma} S g r(t);$$

$$M_{\bar{x}} = \alpha_{\theta} V h p g k r(t); \quad M_{\bar{y}} = \alpha_{\psi} V H p g k r(t);$$

$$M_{\bar{z}} = \alpha_{\phi} V L p g k r(t), \quad (21)$$

где  $\alpha_{\xi}$ ,  $\alpha_{\zeta}$ ,  $\alpha_{\varsigma}$ ,  $\alpha_{\theta}$ ,  $\alpha_{\psi}$ ,  $\alpha_{\phi}$  – редуцированные коэффициенты поперечно-горизонтальной, продольно-горизонтальной, вертикальной, бортовой, килевой качки и рыскания соответственно;  $V$  – водоизмещение судна;  $\rho$  – удельная плотность воды;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $k$  – волновое число,  $k \cong w^2/g$ ;  $S$  – площадь ватерлинии;  $h$ ,  $H$  – малый и большой метацентрический радиусы судна;  $w$  – круговая частота волнения;  $r(t)$  – ордината волнового профиля;  $t$  – время.

По этим же источникам продольно-горизонтальные силы  $F_{\bar{x}}$  и соответствующие им смещения, вызываемые морским волнением, для

достаточно удлиненных судов малы и обычно не учитываются. При определении главной части возмущающих сил корпуса таких судов могут быть представлены профилем крыла малого удлинения. Численный анализ показывает, что даже при волнении высотой 6 м (6 баллов), продольные смещения судов не превышают единиц сантиметров. Плавающие мастерские относятся к достаточно удлиненным судам (с отношением длины к ширине корпуса больше четырех) вследствие большой длины плавучего основания.

Редукционные коэффициенты могут быть определены на основе испытания масштабных моделей либо путем интегрирования расчетных полей давления во взволнованной жидкости.

Переобозначим  $\dot{G}_1 = X_\phi$ ;  $y_1 = \varepsilon_x = W$ . При введении формирующего фильтра (19), (20) система (7) приобретает вид:

$$\begin{cases} \dot{Y}_0 = A_0 Y_0 + B_0 W + C_0 U; \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1; \\ y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2; \\ z = D z + E v, \end{cases} \quad (22)$$

откуда непосредственно следует:

$$\begin{cases} \dot{Y}_0 = A_0 Y_0 + B_0 D_1 G_1 + B_0 E_2 v_2 + C_0 U; \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1, \end{cases}$$

что позволяет представить уравнения состояния процесса шлифования с учетом возмущений, определяемых статистическими характеристиками заготовки как состояния расширенного объекта в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{G}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 D_0 \\ 0 & A_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_0 \\ G_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0 E_0 & 0 \\ 0 & B_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_2 \\ w_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_0 \\ 0 \end{bmatrix} \times U \quad (23)$$

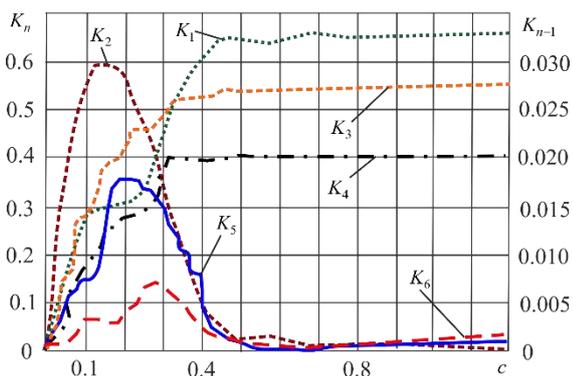


Рис. 3. Зависимость коэффициентов усиления фильтра от времени

Векторно-матричные уравнения (23) представляют стандартную форму описания динамической системы в терминах теории пространства состояний, что позволяет ее использовать для исследования характеристик и поведения процесса, а также для синтеза систем управления этим процессом.

Примеры численных характеристик работы фильтра представлены на рисунках 3 и 4.

Анализ указанных характеристик показывает, что через 0,4 секунды наблюдатель переходит в установившийся режим с готовностью к практическому использованию.

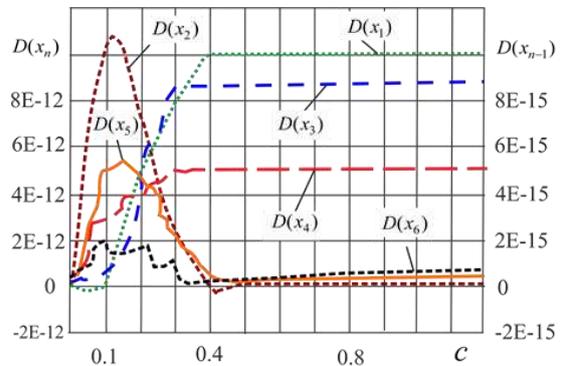


Рис. 4. Зависимость дисперсии оценок от времени

Проведены исследования процессов шлифования шеек валов с целью определения параметров качества обрабатываемых поверхностей, получаемых при различных уровнях внешних воздействий на ПМ-56 и ПМР-463 в производственных условиях (рисунок 5), а также на экспериментальном стенде (рисунок 6) в исследовательской лаборатории.

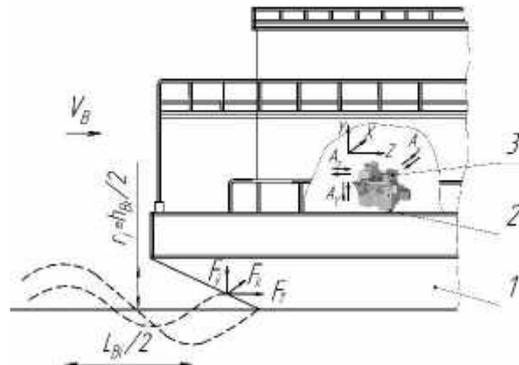


Рис. 5. Схема расположения круглошлифовального станка на участке ПМ:

1 – плавучее основание, 2 – поверхность палубы, 3 – станок 3В12

Экспериментально исследованы вибрационные воздействия на круглошлифовальный станок в условиях плавучей мастерской, получены частоты колебаний (в зонах измерения – станина-фундамент, а также на направляющих стола станка в поперечном и вертикальном направлениях), зависимость амплитуды колебаний в указанных зонах круглошлифовального станка от интенсивности морского волнения. Это позволило задать входные параметры процесса круглого шлифования для прогнозирования поведения технологической системы.

Через плавучее основание 1 (рисунок 5) вибрации от морского волнения с меняющейся высотой волны в зависимости от уровня (слабого, значительного или сильного) с высотой волны  $h_{Bi}$ , (определяемой через величину  $h_{3\%}$  – высоту волны 3%-й обеспеченности соответственно для слабого – 0...0,75 м,

значительного – 0,75...2,0 м или сильного – 2,0...6,0 м уровней), передаются на поверхность палубы 2 с фундаментом, на котором установлен станок 3.

В зависимости от направления и скорости ветра  $V_B$  (радиуса  $r_i$  и длины волны  $L_{Bi}$ ) силы  $F_{\bar{x}}, F_{\bar{y}}, F_{\bar{z}}$ , с которыми волны ударяются о плавучее основание, передают вибрационные воздействия соответственно через палубу и фундамент станине закрепленного на нем станка. Станок ощущает вибрации и виброперемещения с амплитудами  $A_x, A_y, A_z$  соответственно в направлениях его осей координат –  $X$  (поперечное перемещение),  $Y$  (вертикальное перемещение),  $Z$  (продольное перемещение). Получена зависимость частоты механических колебаний и амплитуды виброперемещения (в зонах измерения – станина-фундамент, а также на направляющих стола станка в поперечном и вертикальном направлениях) от состояний круглошлифовального станка и уровня морского волнения [2].

Для определения влияния внешних воздействий на качество обработки при шлифовании использовано также лабораторное оборудование (рисунок 6), включающее комплекс контрольно-измерительной аппаратуры и компрессор 1, размещаемый на разном удалении ( $B_{k1}...B_{ki}$ ) от круглошлифовального станка 2.

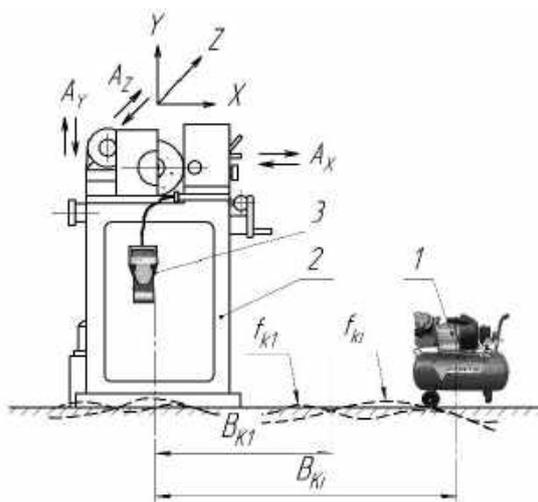


Рис. 6. Схема экспериментального стенда для имитации внешних вибрационных воздействий при шлифовании, идентичных возникающим на ПМ: 1 – компрессор FINI Tiger 245; 2 – станок ВУА 16; 3 – виброметр «Вибротест-МГ4.01»

Экспериментальные исследования показали, что значительное влияние на качество обработки при шлифовании в условиях плавучей мастерской оказывают внешние воздействия как от морского волнения, увеличивая погрешность обработки  $\Delta = f(h_{3\%})$  в 3,8...5,0 раз, так и от соседнего работающего оборудования – в 2,6...3,3 раза. При этом шероховатость  $R_a = f(h_{3\%})$  обрабатываемой поверхности возрастает соответственно в 1,6...2,5 раз от морского волнения и в 1,56...2,5 раз от работающего оборудования. Волнистость  $W = f(h_{3\%})$  поверхностей шеек валов возрастает в

1,23...2,75 раз от морского волнения и в 1,4...3,3 раза от работающего оборудования [2].

Результаты исследований подтверждают неспособность традиционной виброизоляции станков в виде бетонных фундаментов на плавучих мастерских защитить высокоточное оборудование, в частности, шлифовальные станки от морского волнения и обеспечить требуемое качество обработки согласно техническим характеристикам станка [1].

Испытания показали, что с использованием новых виброизолирующих опор обеспечивается заданное качество шлифованных деталей при внешних вибрационных воздействиях от морского волнения и от оборудования. Отклонение формы поверхностей шеек валов ( $\Delta_{\max} - \Delta_{\min}$ ) уменьшалось в среднем от 1,8 до 3,0 раз; шероховатость  $R_{a \max}$  снижалась в среднем в 1,25 раза; уменьшение волнистости  $W_{\max}$  составило в среднем от 1,39 до 1,75 раза (по параметру  $W_z$  уменьшение волнистости – 1,32...1,35 раза) для обработки с разными условиями внешних воздействий.

На основе виброизолирующего устройства разработано устройство автоматической виброзащиты шлифовального станка (патент RU 158629U1) [2], обеспечивающее автоматическое управление демпфированием виброизолирующей опоры станка при внешних воздействиях с привлечением платформы ArduinoUNO и сигналов от вибродатчиков, а также механогидравлической опоры с автоматическим регулированием.

Качество обработки деталей достигается снижением погрешностей их формы, уменьшением шероховатости и волнистости поверхности за счет уменьшения уровня вибрационных воздействий.

### Заключение

Основным источником возмущений в ТС станка, работающего в условиях плавучей мастерской, являются вибрации, передающиеся от воздействий морского волнения на плавучее основание через палубу и фундамент станка. Вследствие такого воздействия фазовые координаты объекта могут быть измерены с существенными случайными ошибками, поэтому для реализации оптимального управления процессом необходимо оценивать его состояние.

Разработанная математическая модель процесса взаимодействия инструмента и заготовки позволяет учитывать динамику вибрационных воздействий на станок от внешней среды через основание плавучей мастерской.

Построенный формирующий фильтр характеризует динамику отклонений шлифовального круга и обрабатываемой заготовки при внешних воздействиях.

На основе созданных математических моделей и построенных оценок состояния системы предложена структура САУ операцией чистового шлифования, применение которой позволит эффективно использовать циклы программного управления без потери стабильности показателей качества изделий при внешних воздействиях на технологическую систему станка в условиях плавучей мастерской.

### Литература

1. Хекерт Е.В., Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О. Влияние внешних факторов на технологическую систему высокоточного станка в условиях плавучих мастерских. Морские интеллектуальные технологии, Санкт-Петербург, изд. НИЦ «МИТ», 2021, Т. 4, № 2 (53), С. 33-37.
2. Братан С.М., Владецкая Е.А., Владецкий Д.О., Харченко А.О. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских. М., изд. «Вузовский учебник: ИНФРА-М», 2018, 154 с.
3. Братан С.М., Владецкая Е.А. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования. Вестник НТУ «ХПИ». Харьков, изд. «НТУ-ХПИ», № 35, 2008, С. 13-22.
4. Владецкая Е.А., Братан С.М., Каинов Д.А. Определение состояния равновесия динамической системы при круглом внутреннем шлифовании. Оптимизация производственных процессов. Севастополь, изд. СевНТУ, 2009, № 11. С. 102-106.
5. Луговский В.В. Динамика моря. Л., изд. «Судостроение», 1976, 200 с.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Санкт-Петербург, Профессия, 2003, 744 с.
7. Расщепляев Ю.С., Фандиенко В.Н. Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления. М., Энергия, 1991, 145 с.
8. Бородай И.К., Невцветаев Ю.А. Качка судов на морском волнении. Л., изд. «Судостроение», 1989, 432 с.
9. Брамлер К., Зифлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. Детерминированные наблюдения и стохастическая фильтрация. М., Наука, 1982, 200 с.

### References

1. Khekert Ye.V., Vladetskaya Ye.A., Bratan S.M., Kharchenko A.O. Vliyaniye vneshnikh faktorov na tekhnologicheskuyu sistemuyu vysokotochnogo stanka v usloviyakh plavuchikh masterskikh [The influence of external factors on the technological system of a high-precision machine tool in the conditions of floating workshops]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, Sankt-Peterburg, izd. NITS «MIT», 2021, T. 4, № 2 (53), S. 33-37.
2. Bratan S.M., Vladetskaya Ye.A., Vladetskiy D.O., Kharchenko A.O. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh [Improving the quality of parts when grinding in floating workshops]. M., izd. «Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M», 2018, 154 s.
3. Bratan S.M., Vladetskaya Ye.A. Analiz vliyaniya kolebaniy, peredavayemykh cherez fundament stanka, na kachestvo protsessa shlifovaniya. [Analysis of the influence of vibrations transmitted through the machine foundation on the quality of the grinding process]. Vestnik NTU «KHPI». Khar'kov, izd. «NTU-KHPI», № 35, 2008, S. 13-22.
4. Vladetskaya Ye.A., Bratan S.M., Kainov D.A. Opredeleniye sostoyaniya ravnovesiya dinamicheskoy sistemy pri kruglom vnutrennem shlifovanii. Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov. [Determination of the state of equilibrium of a dynamic system with internal cylindrical grinding. Optimization of production processes]. Sevastopol', izd. SevNTU, 2009, № 11. S. 102-106.
5. Lugovskiy V.V. Dinamika morya. [Dynamics of the sea]. L, izd. «Sudostroyeniye», 1976, 200 s.
6. Besekerskiy V.A., Popov Ye.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. Sankt-Peterburg, Professiya, 2003, 744 s.
7. Rasshcheplyayev YU.S., Fandiynenko V.N. Sintez modeley sluchaynykh protsessov dlya issledovaniya avtomaticheskikh sistem upravleniya [Synthesis of models of stochastic processes for the study of automatic control systems]. M., Energiya, 1991, 145 s.
8. Boroday I.K., Netsvetayev YU.A. Kachka sudov na morskom volnenii. [Swaying of ships on sea waves]. L. izd. «Sudostroyeniye», 1989, 432 s.
9. Bramler K., Zifling G. Fil'tr Kalmana-B'yusi. Determinirovannyye nablyudeniya i stokhasticheskaya fil'tratsiya [Kalman-Bucy filter. Deterministic observations and stochastic filtering] . M., Nauka, 1982, 200 s.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Екатерина Александровна Владецкая**, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых энергетических установок и электрооборудования, филиал Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова в г. Севастополь, 299006, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, e-mail: vladetska@rambler.ru

**Ekaterina A. Vladetskaya** Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the ship power plant and electrical equipment Department of Sevastopol branch of Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 299006, Sevastopol, 11 Geroev Sevastopolya, e-mail: vladetska@rambler.ru

**Сергей Михайлович Братан**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: serg.bratan@gmail.com

**Sergey M. Bratan** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mechanical engineering technology, Sevastopol state university, 33 Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: serg.bratan@gmail.com

**Александр Олегович Харченко**, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: khao@list.ru

**Alexander O. Kharchenko**, Ph. D. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechanical engineering technology, Sevastopol state university, 33 Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: khao@list.ru

**Евгений Владимирович Хекерт**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Судовождение», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: zur\_mga@nsma.ru

**Evgeniy V. Hekert**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 353924, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: zur\_mga@nsma.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.07.2022.

Научная статья

УДК 621.77.07

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.012>

## Экспериментальная оценка качества вальцованных соединений с различными типами уплотнений

А.В. Санников<sup>1</sup> sonic81@mail.ru, Т.Ю. Стоянов<sup>2</sup> stoyanov.ty@yandex.ru, А.К. Ефремов<sup>1</sup> hunter\_men@inbox.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, <sup>2</sup>Научно-исследовательская технологическая лаборатория

**Аннотация.** В работе рассматривается проблема обеспечения герметичности и прочности вальцованных соединений труб с трубными решетками. Приведены факторы, снижающие герметичность и прочность вальцованных соединений. Описаны два основных способа повышения качества вальцованных соединений путем применения кольцевых уплотнительных элементов, а именно: способ нарезания на стенках отверстий трубной решетки кольцевых канавок прямоугольного сечения, способ формирования на стенках отверстий трубной решетки кольцевого уплотнительного рельефа шариковым раскатником. Для оценки влияния описанных выше способов повышения локальных контактных давлений на прочность и герметичность выполнены сравнительные испытания трех типов соединений: гладких соединений (без кольцевых уплотнительных элементов), соединений с накатанными на поверхности трубной решетки кольцевыми выступами, соединений с нарезанными на поверхности трубной решетки канавками. Описанный в работе эксперимент продемонстрировал существенное повышение герметичности и прочности при применении как канавок, так и кольцевого уплотнительного рельефа в соединении трубы с трубной решеткой.

**Ключевые слова:** вальцованное соединение, герметичность, прочность, кольцевой уплотнительный рельеф, канавки, испытательный образец, экспериментальная оценка, раскатник, канавочник

**Для цитирования:** Санников А.В., Стоянов Т.Ю., Ефремов А.К. Экспериментальная оценка качества вальцованных соединений с различными типами уплотнений, Научно-исследовательская технологическая лаборатория 2022. № 3 часть 1, С. 94—101.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.012>

## Experimental evaluation of the quality of expanded joints with different types of seals

Alexander V. Sannikov<sup>1</sup> sonic81@mail.ru, Timofey Yu. Stoyanov<sup>2</sup> stoyanov.ty@yandex.ru,

Anton K. Efremov<sup>1</sup> hunter\_men@inbox.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, <sup>2</sup>Research and Technological Laboratory, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers the problem of increasing the tightness and strength of expanded tube joints with tubesheets. The factors that reduce the tightness and strength of expanded joints are given. Two main methods of improving the quality of expanded joints by using annular sealing elements are described, namely: a method of cutting annular grooves of rectangular cross-section on the walls of the holes of the tubesheets, a method of forming an annular sealing relief on the walls of the holes of the tubesheets with a ball rolling machine. To assess the effect of the methods for increasing local contact pressures on strength and tightness, comparative tests of three types of joints were performed: smooth joints (without annular sealing elements), joints with annular protrusions rolled on the surface of the tubesheet, joints with grooves cut on the surface of the tubesheet. The experiment described in the paper demonstrated a significant increase in tightness and strength when using both grooves and an annular sealing relief in the connection of a tube with a tubesheet.

**Keywords:** expanded joint, tightness, strength, annular sealing relief, grooves, test sample, experimental evaluation, rollout, groove

**For citation:** Alexander V. Sannikov, Timofey Yu. Stoyanov, Anton K. Efremov Experimental evaluation of the quality of expanded joints with different types of seals, 2Research and Technological Laboratory. 2022. № 3 part 1. P. 94—101.

### Введение

Последовательность создания вальцованного соединения трубы с трубной решеткой описывается тремя основными стадиями.

На первой стадии производится деформирование трубы, установленной с зазором в отверстие трубной решетки, до выбора этого зазора.

На второй стадии развальцовки происходит совместное деформирование трубы с трубной

решеткой. При этом труба деформируется пластически, а трубная решетка упруго-пластически.

На третьей стадии после извлечения вальцовочного инструмента из трубы трубная решетка упруго разгружается и обжимает трубу, которая остается в состоянии пластической деформации. Таким образом, между трубой и трубной решеткой возникают контактные давления [1,2,4].

## 1. Понятие герметичности и прочности

Качество соединений труб с трубными решетками характеризуется их герметичностью и прочностью.

Герметичность – это способность соединения выдерживать давление теплоносителя без протечек. Количественно герметичность определяется максимальной величиной перепада давления, воспринимаемого соединением без протечек.

Прочность – способность соединения выдерживать осевые усилия, возникающие в процессе работы теплообменного аппарата, без относительного осевого смещения трубы и трубной решетки. Количественно прочность определяется величиной осевого усилия, при котором происходит сдвиг трубы относительно трубной решетки.

Герметичность и прочность зависят главным образом от величины остаточных радиальных напряжений (контактных давлений) между сопряженными поверхностями соединения [3].

## 2. Факторы, снижающие герметичность и прочность

Существует ряд факторов, снижающих герметичность и прочность вальцованных соединений:

- неправильно назначенное на этапе проектирования соотношение механических свойств материалов труб и трубных решеток, когда предел текучести материала трубы превышает аналогичную характеристику материала трубной решетки, что может привести к невозможности получения соединения деформационным способом;
- малая толщина трубных решеток, не позволяющая создать в соединении контактных давлений, обеспечивающих необходимые герметичность и прочность;
- наличие теплоносителей с повышенной проникающей способностью (керосин);
- повышенная шероховатость поверхности отверстий трубной решетки;
- повышенная овальность отверстий в трубной решетке, которая приводит к неравномерному распределению контактных давлений по периметру соединения;
- наличие на стенках отверстий в трубных решетках осевых или спиральных рисок, по которым происходит разгерметизация [2,4].

## 3. Способы повышения герметичности и прочности

В настоящее время известны два способа обеспечения качества вальцованных соединений путем повышения локальных контактных давлений.

К первому способу относится нарезание на стенках отверстий трубной решетки кольцевых канавок прямоугольного сечения глубиной до 0,5 мм на сторону (рис.1,2) [3].

Повышенную герметичность и прочность в вальцованном соединении достигаются за счет локального увеличения контактных давлений в зоне концентраторов напряжений – кромок канавки [2,4].

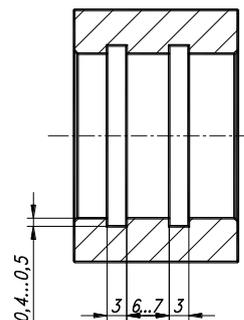


Рис. 1 Эскиз отверстия трубной решетки с канавками

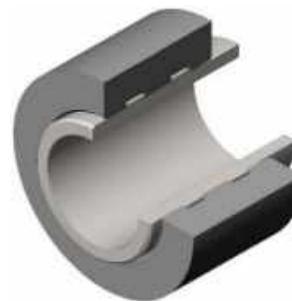


Рис. 2 Модель соединения с канавками

Второй способ повышения локальных контактных давлений в соединении заключается в формировании на стенках отверстий кольцевого уплотнительного рельефа шариковым раскатником. Высота выступов рельефа находится в диапазоне 0,04...0,10 мм в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия.

За счет поверхностного упрочнения (наклепа) твердость поверхности выступов кольцевого рельефа в среднем на 10-15% выше твердости металла трубной решетки.

В процессе последующей развальцовки кольцевые выступы рельефа внедряются в наружную поверхность трубы, увеличивая контактные давления в соединении, и тем самым повышая герметичность и прочность вальцованного соединения (рис. 3,4) [2,3,4].

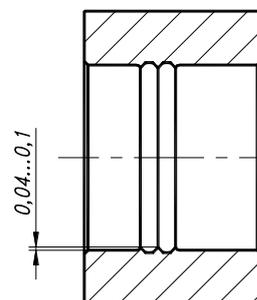


Рис. 3 Эскиз отверстия трубной решетки с кольцевым уплотнительным рельефом

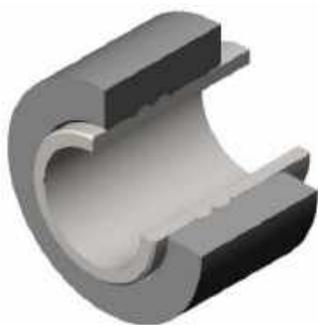


Рис. 4 Модель соединения трубной решетки с кольцевым уплотнительным рельефом

#### 4. Исследование влияния различных видов кольцевых уплотнительных элементов на прочность и герметичность

Для оценки влияния описанных выше способов повышения локальных контактных давлений на прочность и герметичность были выполнены сравнительные испытания трех типов соединений: гладких соединений (без кольцевых уплотнительных элементов), соединений с накатанными на поверхности трубной решетки кольцевыми выступами, соединений с нарезанными на поверхности трубной решетки канавками.

##### 4.1. Описание испытательных образцов

В качестве образцов соединений трубных решеток с трубами были использованы однотрубные образцы, представляющие из себя втулки с развальцованными в них трубами [4].

Для испытаний на герметичность были изготовлены 60 образцов, по 20 штук на каждый тип соединения (гладкое, с кольцевыми выступами, с канавками). Материал втулок – Сталь 40 Х. Конструкцией образцов были предусмотрены два пояса развальцовки шириной по 25 мм. Между поясами была выполнена кольцевая проточка, в которую через радиальное отверстие подавалась под давлением испытательная жидкость (рис. 5,6).

Для испытаний на прочность также изготовлено 60 образцов по 20 штук на каждый тип соединения. Материал втулок – Сталь 40 Х. На втулках в соответствии со схемой испытаний выполнен один пояс закрепления (рис. 7,8).



Рис. 5 Разрезанный испытательный образец

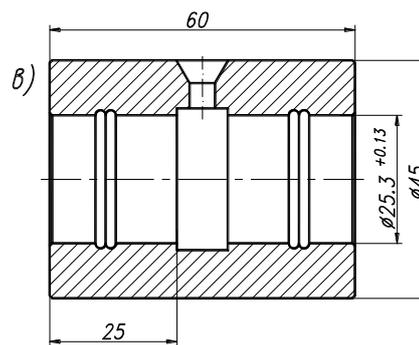
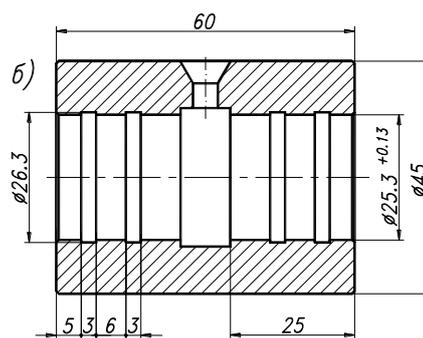
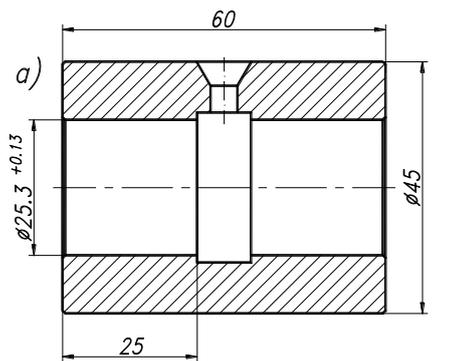


Рис. 6 Эскизы трубных решеток для испытаний образцов соединений на герметичность:

- а) гладкое соединение; б) соединение с канавками; в) соединение с кольцевыми уплотнительными элементами



Рис. 7 Испытательный образец

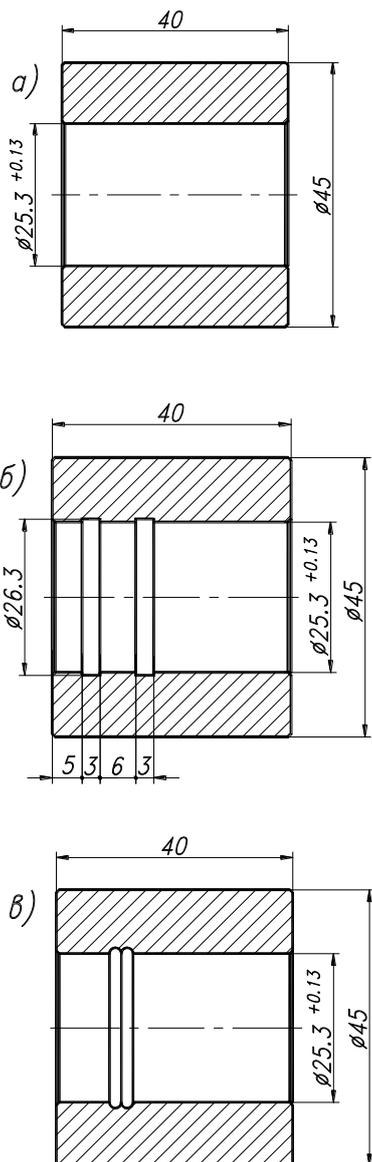


Рис. 8 Эскизы трубных решеток для испытаний образцов соединений на прочность:

- а) гладкое соединение; б) соединение с канавками;
- в) соединение с кольцевыми уплотнительными элементами

Материал труб для всех типов соединений и видов испытаний – Сталь 20. Наружный диаметр труб - 25 мм, толщина стенки - 2,5 мм.

Развальцовка всех соединений производилась цилиндрической трехроlikовой вальцовкой Р-20 с использованием привода ВМ-200 [5].

#### 4.2. Испытание образцов на герметичность

Для определения герметичности экспериментальных образцов использована установка (рис. 9), развивающая давление рабочей жидкости до 160 МПа. Основными узлами этой

установки являются: масляный плунжерный насос высокого давления, устройство для закрепления экспериментальных образцов и подвода к ним рабочей жидкости, манометр и разделительная емкость, в которой давление масла передается воде.

Методика проведения гидравлических испытаний заключалась в ступенчатом повышении давления с выдержкой 15 сек. после каждого увеличения давления. Момент нарушения герметичности регистрировался по появлению капель в местах сопряжения трубы с трубной решеткой на торце образца.

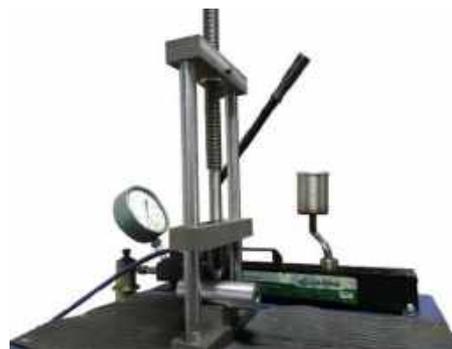


Рис. 9 Гидравлический пресс для испытания образцов соединений на герметичность

Результаты испытаний представлены в табл. 1, а также для большей сравнительной наглядности на рис. 10.

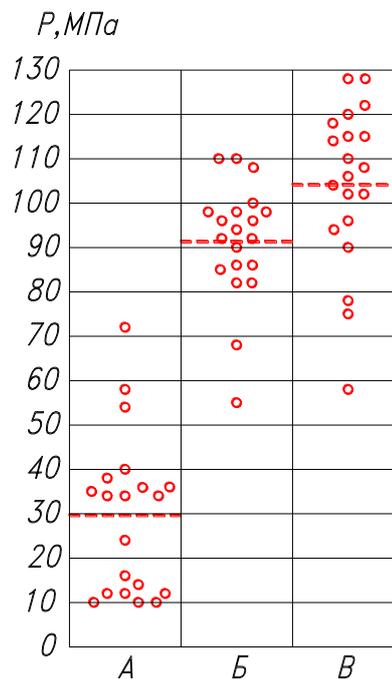


Рис. 10 Результаты испытаний на герметичность:

- А – гладкое соединение; Б- соединение с кольцевыми уплотнительными элементами; В - соединение с канавками

Таблица 1

Результаты испытаний образцов на герметичность

Гладкое соединение		Соединение с кольцевыми выступами		Соединение с канавками	
№ обр.	Давление разгерметизации, МПа	№ обр.	Давление разгерметизации, МПа	№ обр.	Давление разгерметизации, МПа
1	15,69	1	66,69	1	56,88
2	33,34	2	90,22	2	94,14
3	39,23	3	105,91	3	100,03
4	23,54	4	53,94	4	103,95
5	52,96	5	92,18	5	101,99
6	70,61	6	96,11	6	125,53
7	33,34	7	94,14	7	112,78
8	34,32	8	84,34	8	112,78
9	33,34	9	90,22	9	105,91
10	11,77	10	94,14	10	117,68
11	35,30	11	88,26	11	119,64
12	9,81	12	98,07	12	76,49
13	37,27	13	84,34	13	100,03
14	13,73	14	107,87	14	125,53
15	11,77	15	80,41	15	111,80
16	9,81	16	107,87	16	92,18
17	35,30	17	83,36	17	107,87
18	9,81	18	96,11	18	73,55
19	56,88	19	96,11	19	88,26
20	11,77	20	80,41	20	115,72

Средние значения давлений разгерметизации составляют: 102,14 МПа для соединений с канавками, 89,53 МПа для соединений с кольцевыми выступами, 28,98 МПа для гладких соединений.

**4.3. Испытание образцов на прочность**

Прочность образцов соединений оценивалась с помощью гидравлической машины растяжения-сжатия ThuringerIndustriewerk ZD-10/90, развивающей усилие до 100000 Н.

В пробку-заглушку, сваренную в выступающий конец трубы образца, упирался закаленный шток, к которому прикладывалась плавно возрастающая осевая нагрузка. При сдвиге трубы относительно втулки фиксировалась величина осевой нагрузки.

Схема испытаний образцов соединений на прочность показана на рис. 11.

Результаты испытаний представлены в табл. 2, а также для большей сравнительной наглядности на рис. 12.

Как видно из табл. 2, средние значения усилий сдвига составляют: 51200 Н для соединений с канавками; 47900 Н для соединений с кольцевыми выступами, 40100 Н для гладких соединений.

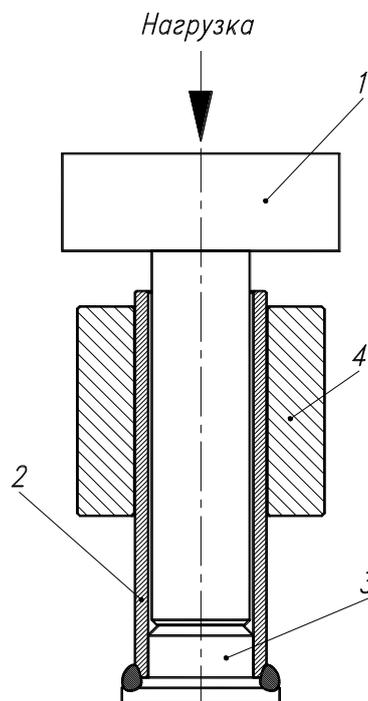


Рис. 11 Схема испытания образцов на прочность: 1 - шток, 2 - труба, 3 - пробка-заглушка, 4 - трубная решетка

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на прочность

Гладкое соединение		Соединение с кольцевыми выступами		Соединение с канавками	
№ обр.	Усилие сдвига, кН	№ обр.	Усилие сдвига, кН	№ обр.	Усилие сдвига, кН
1	38	1	52	1	49
2	46	2	45	2	43
3	44	3	46	3	45
4	42	4	52	4	53
5	42	5	50	5	45
6	45	6	41	6	62
7	30	7	48	7	55
8	38	8	47	8	50
9	41	9	50	9	49
10	40	10	41	10	50
11	38	11	45	11	42
12	43	12	45	12	60
13	36	13	50	13	50
14	39	14	52	14	55
15	39	15	50	15	47
16	35	16	47	16	55
17	38	17	49	17	65
18	44	18	51	18	49
19	43	19	47	19	53
20	41	20	50	20	47

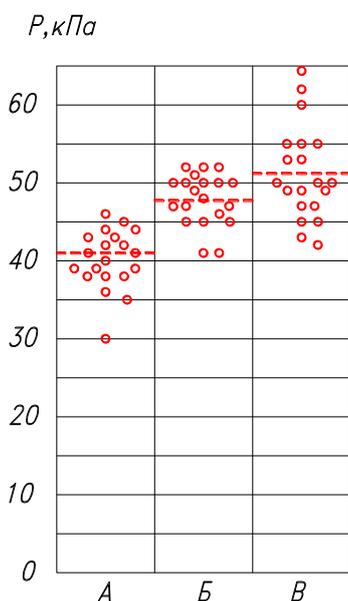


Рис. 12 Результаты испытаний на прочность:

А - гладкое соединение; Б - соединение с кольцевыми уплотнительными элементами; В - соединение с канавками

**Заключение**

Проведенный эксперимент продемонстрировал существенное повышение герметичности и прочности при применении как канавок, так и кольцевого уплотнительного рельефа в соединении трубы с трубной решеткой.

В некоторых случаях применение шарикового раскатника для формирования кольцевого уплотнительного рельефа может оказаться более технологичным, чем использование канавочника для нарезания канавок на стенках отверстий в трубных решетках, например, при производстве ремонтных работ или при обработке отверстий малых (менее 12 мм) диаметров.

Иногда локальное повышение твердости стенок отверстий трубных решеток путем обкатывания шариковым раскатником может оказаться единственным способом получения вальцованного соединения для данного сочетания материалов трубы и трубной решетки.

### Литература

1. Каган В.Л. Развальцовочный инструмент. - Волгоград: Альянс, 2006. – 128 с.
2. Повышение эффективности и надежности теплообменных аппаратов паротурбинных установок в условиях эксплуатации / Под общ. ред. Ю.М. Бродова. - Е.: УрФУ, 2010. – 308 с.
3. СТО-02066380-001-2019 "Крепление труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. Общие технические требования".
4. Кузнецов И. Л. Разработка технологии изготовления и применения проставочных элементов и покрытий для повышения герметичности и прочности соединений труб с трубными решетками судового теплообменного оборудования: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения (судостроение и судоремонт)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузнецов Илья Леонидович ; Ленинградский кораблестроительный институт. - Ленинград, 1987. - 158 с. - Библиогр.: с. 146-155. - Место защиты: Лен. кораблестроительный ин-т. - Текст: непосредственный.
5. Каталог СПбГМТУ НИТЛ 2020 "Инструмент для изготовления и ремонта теплообменного оборудования". – URL: <https://nitl.ru/catalog/> (дата обращения: 06.05.2022).
6. Дорошенко П.А. Производство судовых котлов и теплообменных аппаратов. – Ленинград: Судостроение, 1964. – 219 с.
7. Справочник по теплообменным аппаратам паротурбинных установок/ Под общ. ред. Ю.М. Бродова. - Е.: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. – 584 с.
8. Ремонт и техническое обслуживание оборудования паротурбинных установок: справочник. В 2 т. Т. 2/ Под общ. ред. Ю.М. Бродова. – Е.: УрФУ, 2011. – 487 с.
9. Кузнецов И.Л. Повышение герметичности и прочности соединений труб с трубными решетками теплообменных аппаратов за счет применения проставочных сред/ И.Л. Кузнецов, В.И. Черненко //Сб. НТО им. А.Н. Крылова. Л., 1985. Вып.403. С.22-27.
10. Юзик С.И. Развальцовка труб в судовых теплообменных аппаратах/ С.И. Юзик. Л.: Судостроение, 1978. 114 с.

### References

1. Kagan V.L. Razval'covochnyj instrument [Expanding tool]. Volgograd: Al'jans, 2006. 128 s.
2. Povyshenie jeffektivnosti i nadezhnosti teploobmennyykh apparatov paroturbinnyykh ustanovok v usloviyah jekspluatatsii [Improving the efficiency and reliability of heat exchangers of steam turbine plants in operating conditions]. Pod obshh. red. Ju.M. Brodova. E. UrFU, 2010. S 308 s.
3. STO-02066380-001-2019 "Kreplenie trub v trubnykh reshetkah teploobmennyykh apparatov. Obshhie tehniczeskie trebovaniya" [Expansion of tubes in the tubesheets of heat exchangers. General technical requirements].
4. Kuznetsov I. L. Razrabotka tehnologii izgotovleniya i primeneniya prostavochnykh jelementov i pokrytij dlja povysheniya germetichnosti i prochnosti soedinenij trub s trubnymi reshetkami sudovogo teploobmennogo oborudovaniya [Design of manufacturing technology and use of spacer elements and coatings to improve the tightness and strength of tube connections with tubesheets of marine heat exchange equipment]: special'nost' 05.02.08 «Tehnologija mashinostroeniya (sudostroenie i sudoremont)» : dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniczeskih nauk / Kuznetsov Il'ja Leonidovich ; Leningradskij korablestroitel'nyj institut. - Leningrad, 1987. - 158 s. - Bibliogr.: s. 146-155. - Mesto zashhity: Len. korablestroitel'nyj in-t. - Tekst: neposredstvennyj.
5. Katalog SPbGMTU NITL 2020 "Instrument dlja izgotovleniya i remonta teploobmennogo oborudovaniya" [Instrument for the manufacture and repair of heat exchange equipment]. – URL: <https://nitl.ru/catalog/> (data obrashheniya: 06.05.2022)
6. Doroshenko P.A. Proizvodstvo sudovykh kotlov i teploobmennyykh apparatov. – Leningrad: Sudostroenie, 1964. – 219 s.
7. Spravochnik po teploobmennym apparatam paroturbinnyykh ustanovok/ Pod obshch. red. Yu.M. Brodova. - E.: GOU VPO UGTU – UPI, 2006. – 584 s.
8. Remont i tehniczeskoe obsluzhivanie oborudovaniya paroturbinnyykh ustanovok: spravochnik. V 2 t. T. 2/ Pod obshch. red. Yu.M. Brodova. – E.: UrFU, 2011. – 487 s.
9. Kuznetsov I.L. Povyshenie germetichnosti i prochnosti soedinenij trub s trubnymi reshetkami teploobmennyykh apparatov za schet primeneniya prostavochnykh sred/ I.L. Kuznetsov, V.I. Chernenko //Sb. NTO im. A.N. Krylova. L., 1985. Vyp.403. S.22-27.
10. Yuzik S.I. Razval'tsovka trub v sudovykh teploobmennyykh apparatakh/ S.I. Yuzik. L.: Sudostroenie, 1978. 114 s.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Владимирович Санников**, ведущий инженер, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [sonic81@mail.ru](mailto:sonic81@mail.ru)

**Alexander V. Sannikov** Leading Engineer, "Research Technological Laboratory" St. Petersburg State Marine Technical University 3, Lotsmanskaya str., Saint Petersburg, 190121, Russian Federation e-mail: [sonic81@mail.ru](mailto:sonic81@mail.ru)

**Тимофей Юрьевич Стоянов**, ведущий инженер, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: : stoyanov.ty@yandex.ru

**Timofey Yu. Stoyanov** Leading Engineer, "Research Technological Laboratory" St. Petersburg State Marine Technical University 3, Lotsmanskaya str., Saint Petersburg, 190121, Russian Federation e-mail: stoyanov.ty@yandex.ru

**Антон Константинович Ефремов**, ведущий инженер, Санкт-Петербургский морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: hunter\_men@inbox.ru

**Anton K. Efremov**, Leading Engineer, "Research Technological Laboratory" St. Petersburg State Marine Technical University 3, Lotsmanskaya str., Saint-Petersburg, 190121, Russian Federation e-mail: hunter\_men@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 27.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.06.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 10.07.2022.

Научная статья

УДК 629.5.081+658.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.013>

## Анализ технологии ремонта корпуса судна из полимерных композиционных материалов

А.В. Фирсова<sup>1</sup> firsova-a-v@mail.ru, А.С. Бачев<sup>1</sup> battarius@hotmail.com

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация** Полимерные композиционные материалы имеют широкое применение в судостроении, вопрос ремонта изучен в основном в малотоннажном судостроении. В данной статье приведены основные сферы применения полимерных композиционных материалов, как в процессе изготовления, так и при ремонте судов и судовых конструкций. Для обеспечения полноты исследования описаны различной степени повреждения корпусных секций корабельных надстроек, приведены возможные причины их возникновения. Также рассмотрены типовые технологические процессы при восстановлении и ремонте обозначенных поврежденных секций. Отдельный акцент сделан на определении трудозатрат на ремонт конструкций из полимерно-композиционных материалов, приведены соответствующие расчеты. Среди прочих сложностей применения полимерных композитов специалистами отмечается скудная нормативная база и сложность технологии ремонта таких конструкций. Авторы данной статьи предлагают краткий обзор и анализ этих проблем. В заключении сделаны выводы о недостаточности проводимых заранее расчетов при принятии решения о целесообразности восстановления конструкции посредством ремонтных работ и необходимости рассмотрения в таких случаях результатов испытаний.

**Ключевые слова:** судоремонт; технология; эффективность; корпус, корпусные конструкции, надстройка; нормирование; трудоёмкость, прочность, дефект, износ, модуль

**Для цитирования:** Фирсова А.В., Бачев А.С. Анализ технологии ремонта корпуса судна из полимерных композиционных материалов. 2022. № 3 часть 1, С. 102—108.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.013>

## Analysis of the technology of repairing the hull of a vessel made of polymer composite materials

Anna V. Firsova<sup>1</sup> firsova-a-v@mail.ru, Alexey S. Bachev<sup>1</sup> battarius@hotmail.com

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** Polymer composite materials are widely used in shipbuilding, the issue of repair has been studied mainly in low-tonnage shipbuilding. This article presents the main areas of application of polymer composite materials, both in the manufacturing process and in the repair of ships and ship structures. To ensure the completeness of the study, various degrees of damage to the hull sections of ship superstructures are described, and possible causes of their occurrence are given. Typical technological processes for the restoration and repair of designated damage sections are also considered. A separate emphasis is placed on the determination of labor costs for the repair of structures made of polymer-composite materials, the corresponding calculations are given. Among other difficulties in the use of polymer composites, experts note the meager regulatory framework and the complexity of the repair technology of such structures. The authors of this article offer a brief overview and analysis of these problems. In conclusion, conclusions are drawn about the insufficiency of calculations carried out in advance when deciding on the feasibility of restoring the structure through repair work and the need to consider test results in such cases.

**Keywords:** ship repair; technology; efficiency; hull, hull structures, superstructure; rationing; labor intensity, strength, defect, wear, module

**For citation:** Anna V. Firsova, Alexey S. Bachev Analysis of the technology of repairing the hull of a vessel made of polymer composite materials. 2022. № 3 part 1. P. 102—108.

### Введение

Конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ) имеют широкое распространение в современном отечественном и зарубежном судостроении. Основным конструкционным материалом для корпусов на данный момент является стеклопластик, который начали применять в судостроении еще на рубеже 1950-1960 гг.. Он в наибольшей степени отвечает требованиям, предъявляемым к неметаллическим судостроительным материалам и по ряду характеристик способен конкурировать со сталями и

легкими сплавами [1]. Данный материал прочно закрепил позиции в строительстве лодок, корпусов катеров, спортивных судов, стратегических кораблей, к которым предъявляется требование стелс-технологий [2], а также крупногабаритных конструкций, устанавливаемых на металлические суда (надстройки, рубки).

### 1. Особенности и проблемы изготовления и ремонта изделий из ПКМ

Как и прочие конструкционные материалы, ПКМ обладают рядом плюсов и минусов. В сравнении с

металлическими материалами у ПКМ меньший удельный вес, большая прочность и меньшая жесткость. Также они не поддаются коррозии, но подвержены осмотическому влиянию, немагнитны, но более сложны с технологической точки зрения и дороже с экономической.

Постройка судна из стеклопластика предстает сложным процессом, требующим большой доли ручного труда и сопровождающимся существенным отрицательным влиянием на окружающую среду. [4] Согласно требованиям Российского морского регистра судоходства, части XVI «Конструкция и прочность корпусов судов и шлюпок из стеклопластика», плоские секции надстройки формируются методом вакуумной инфузии. Основными преимуществами такого метода в сравнении с контактным формованием являются возможности:

- частичной механизации процессов за счёт исключения операций пропитки, прикатки и уплотнения армирующего материала, снижая тем самым влияние человеческого фактора;
- повышения качественных характеристик изделия за счёт автоматизированного контроля связующего и достижения более высокой плотности укладки армирующего материала;
- улучшения условий труда посредством существенного снижения выбросов вредных веществ в окружающую среду;
- относительное снижение трудозатрат и сокращение продолжительность цикла, что поможет увеличить количество съёмов изделий с оснастки за смену, также один рабочий сможет обслуживать одновременно несколько аппаратов, производящих инъекцию;
- обеспечение глянцевого качества поверхности;
- минимизация отходов материалов;
- моделирование процесса вакуумной инфузии при помощи современных программных продуктов, что позволит сократить время на технологическую подготовку производства конструкций из ПКМ и повысить качество всех видов подготовки производства.

Среди недостатков вакуумной инфузии стоит отметить:

- сложность процесса производства;
- необходимость иметь инъекционное оборудование;
- потребность в изготовлении большого количества различной оснастки.

Однако сложности, связанные с изготовлением продукции из ПКМ дополняются ещё и проблемами судоремонтных работ таких конструкций.

## 2. Возможности автоматизации процессов изготовления и ремонта изделий из ПКМ

Требования к средствам автоматизации и цифровым решениям в производстве судостроительной продукции основаны, как правило опираются на три позиции: контроль качества, соблюдение сроков и обеспечение соответствия стоимостным расчетам в процессе производства.

При ремонтных работах задачи планирования и управления производством ещё сложнее.

Обновление отечественного флота на данный момент не завершено, и количество судов на пределах сроков использования и за их пределами создает обширный и разнообразный фронт работ. Индивидуальные методические базы предприятий для расчетов и существенное разнообразие поставщиков материалов и комплектующих, не входящих пока в какую-либо единую справочную систему усложняют процессы планирования.

Следует при этом отметить наличие у крупных предприятий отрасли внутренних программных решений, которые успешно справляются с многоименной базой и обеспечивают стабильную поддержку производства в части документационного и управленческого обеспечения. Но и такие программы не имеют единства, поэтому не отвечают в полной мере требованиям создание единого информационного пространства отрасли и даже корпорации. Тем не менее, объединение практик предприятий может привести к желаемому прорыву в этой области, путем формирования согласованного программного продукта с высокой степенью гибкости и адаптивности. [5]

Для предприятий, занятых в ремонтной области, в числе прочих задач можно выделить потребности в:

- формировании и оценка ремонтных ведомостей изделий;
- формировании и обеспечении исполнения плановых параметров работ и показателей деятельности предприятий;
- логистическое обеспечение производства (внешнее и внутреннее);
- автоматическое формирование документации;
- согласование и разработка корректирующих мероприятий и процессов, обеспечивающих соблюдение предыдущих пунктов, и прочее.

На пути успеха стоит ряд проблем рыночного развития, таких как конкуренция и отсутствие единства требований и подчиненности. Однако, механизмы обмена интеллектуальной собственностью и сотрудничества прорабатываются.

## 3. Определение трудозатрат на ремонт изделий из ПКМ

Рассмотрим ремонт конструкций из ПКМ и трёхслойного композиционного материала (ТС ПКМ). Такие конструкции изготавливаются преимущественно монолитными или с минимальным количеством соединений, что обеспечивает высокую прочность. Дополнительные соединения невозможно обеспечить равнопрочными, и это является предметом дополнительных прочностных расчётов.

В общем, главным вопросом, на который хотелось бы найти ответ, является целесообразность проведения ремонтных работ в сравнении с частичной, возможно, модульной или полной заменой поврежденной конструкции.

Обратим внимание на аспекты дефектации, ремонта и нормирования конструкции надстройки из ТС ПКМ, расположенной в среднем районе верхней палубы (ВП). (рис. 1).

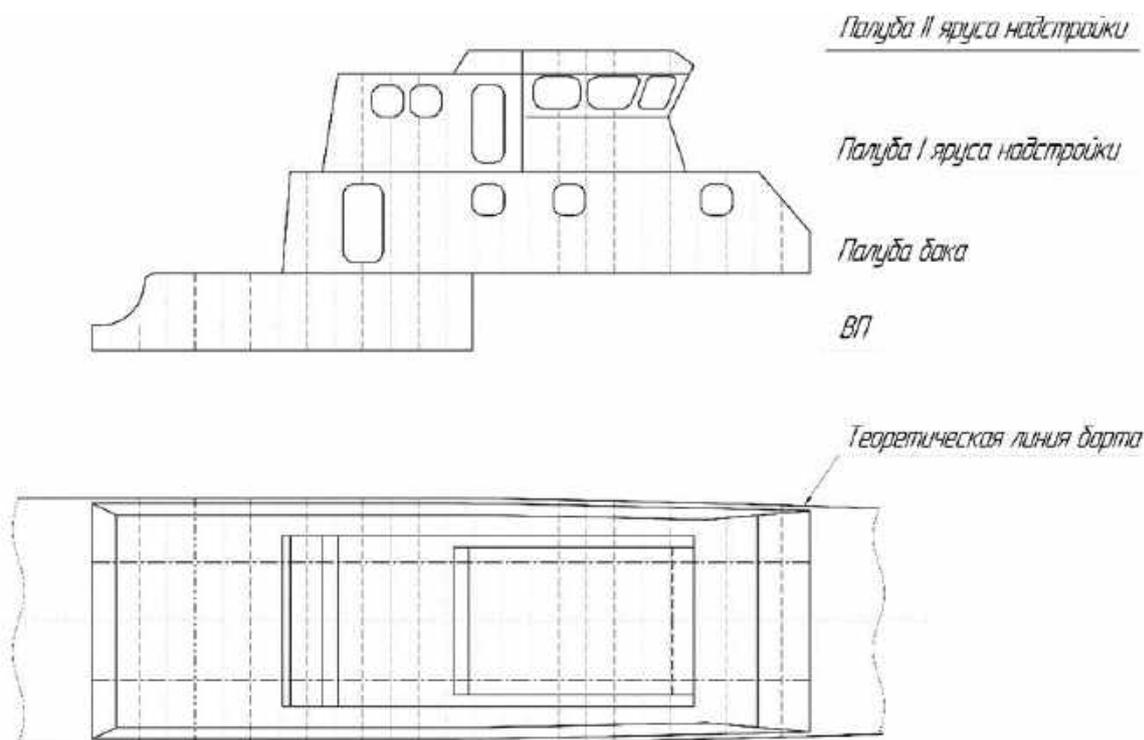


Рис. 1. Надстройка судна из ПКМ

Трудозатраты на постройку такой секции приведены в таблице 1, а на ремонт – в таблице 2.

Таблица 1

Сводная таблица затрат труда на постройку секции

Вид работ	Норма времени, нормо-час	Трудозатраты на секцию, н/ч.
Подготовка рабочей поверхности	0,50	21,42
Укладка разд. ткани и смолопроводящей сетки	0,34	14,6
Раскрой и укладка армирующего стекломатериала 1 несущего	1,10	47,12
Разметка, распиловка, склеивание и маркировка пенопласта	1,47	62,97
Укладка пенопласта и стыкование	1,3	55,69
Раскрой и укладка армирующего стеклопластика 2 несущий	0,66	28,27
Укладка разделительной ткани и смолопроводящей сетки	0,23	9,85
Установка вспомогательных материалов	0,60	25,7
Формирование вакуумного мешка	0,40	17,14
Проверка герметичности вакуумного мешка	0,23	9,86
Подключение вакуумных трубок и проведение инфузии	0,23	9,86
Приготовление связующего	0,33	14,14
Демонтаж вакуумного мешка и вспом. материалов	0,85	36,42
Изготовление и приформовка П-набора	6,68	491
Термостатирование	0,01	0,43
Итого	-	834,63

Всю совокупность дефектов, возникающих на судне, можно классифицировать, как:

- а) Разрушения – дефекты, исключающие возможность нормальной эксплуатации конструкции и требующие немедленного ремонта;
- б) Повреждения – дефекты, нарушающие нормальные условия эксплуатации конструкций. В общем случае к повреждениям относятся:
  - износ – уменьшение построечных размеров элементов корпуса судна со временем.
  - остаточная деформация – изменение первоначальной формы конструкции.

- трещина, разрыв – нарушение целостности элементов корпуса.

При рассмотрении конструкций из стеклопластика, различают наружные и внутренние дефекты.

К наружным дефектам декоративного слоя относят:

- неровности;
- раковины;
- выделение текстуры армирующего материала;
- отслоение;
- вспучивание;

- трещины;
  - эрозийный износ
- Внутренними дефектами (в ламинате) являются:
- воздушные включения;
  - пористость полимеризовавшегося связующего;
  - неполная полимеризация;
  - посторонние включения;
  - отклонения в массовом соотношении связующего и армирующего материала;
  - внутренние трещины;
  - изменение внутренней структуры композита от воздействия внешней среды (осмотическое разрушение).

Указанные дефекты различным образом и в разной степени влияют на физико-механические свойства конструкции. К примеру, неровности, трещины в декоративном слое и просвечивание структуры стекловолокна сразу не окажут значительного влияния на поверхность, но со временем эти поверхностные дефекты могут привести к значительному ослаблению материала. Под действием агрессивных сред незащищенное внешним слоем стекловолокно разрушается, что напрямую способствует сильному ухудшению физико-механических показателей конструкции. Внутренние дефекты, в отличие от внешних, начинают сразу оказывать влияние на прочностные характеристики, а степень влияния зависит от размеров, местоположения и условий работ материала.

Различные виды дефектов, как правило, соседствуют друг с другом и тесно связаны. Трещины часто являются следствием избыточной доли массы связующего в массе конструкции.

Расслоение материала является одним из самых распространенных видов дефектов. Расслоения первого рода обуславливаются слабой адгезией между слоями армирующего материала из-за неравномерного распределения связующего. В точках недостатка связующего не обеспечивается достаточной связи между соседними слоями армирующего материала. Другим примером несоблюдения технологического процесса может быть неровность поверхности и как следствие – недостаточное прилегание последующего слоя к предыдущему. Особенно сильно расслоению подвержены конструкции в местах перегиба или имеющие резкие переходы из одной плоскости в другую (район скулы). Приформованные слои (напр. «мокрый» (приформовочный) угольник) формируются на поверхность уже отвержденного материала. В таком случае прочность соединения зависит от качества подготовки поверхностей соединяемых деталей и правильности выбора материалов.

При подготовке материала для данной статьи был разработан типовой технологический процесс для ремонта секции с различными вариантами повреждений и определена трудоемкость работ нормам времени, полученным усреднением данных из различных справочных материалов, действующих на предприятиях-строителях. Для примера был разработан типовой технологический процесс для ремонта секции с повреждением наружной обшивки (НО) различной степени и сложности, а именно - наружного декоративного слоя, пробоиной повреждением смежного ребра жесткости (РЖ) и повреждениями балок главного направления П-образного профиля (рис.2). Размер типового судна LxВxТxН 31,3x6,0x1,75x2,5м, размер надстройки в плане 7650x5600 мм.

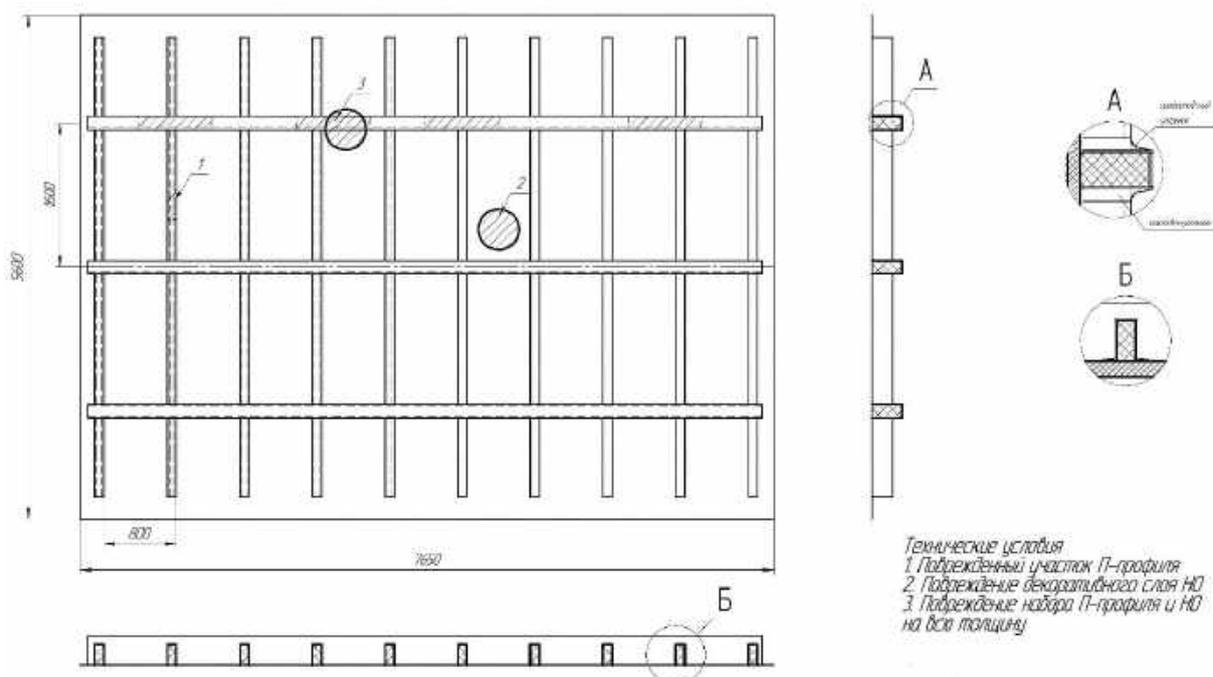


Рис. 2. Повреждения секции надстройки

Таблица 2

Сводная таблица затрат труда на ремонт секции

Вид работ	Норма времени, нормо-час	Трудозатраты на секцию, нормо-час
1. Ремонт повреждения участка набора, поз. 1		3,4
а) демонтаж участка П-профиля	2,5	1,1
б) изготовление и приформовка закладного участка	6,68	2,32
2. Ремонт повреждения декоративного слоя обшивки, поз. 2		1,97
а) зачистка	0,9	0,57
б) заформовка	1,2	0,76
в) нанесение декор. покрытия	1,0	0,64
3. Ремонт сквозного пробоины обшивки с удалением прилегающего продольного набора, поз. 3		196,05
а) удаление продольного РЖ	2,5	18,75
б) зачистка пробоины до "здорового" стеклопластика", разделка кромок	2,8	23,2
в) изготовление заплатки и приформовка вакуумным методом	4,7	103
д) изготовление и приформовка продольного РЖ	6,68	51,102
4. Термостатирование	0,01	0,43
5. Итого		201,42
6. Соотношение % от затрат на изготовление секции		24,13%

### Заключение

Для спроектированной секции палубы I яруса надстройки при повреждениях 1,59% трудоёмкость ремонта составит 24,13% от трудозатрат на изготовление новой конструкции в связи с тем, что потребуются вырубка и полная замена поврежденной балки продольного направления. Типовые расчеты приведены на основе усредненных данных предприятий – производителей РФ.

Во многом современный уровень технологий и методик производства и восстановления судостроительных конструкций из полимерных композитов базируется на результатах экспериментальных исследований, которые со временем образуют полноценные методические комплексы. Ограничиваться одними расчетами затрат при принятии решения о ремонте или замене конструкций далеко не всегда представляется возможным. [6-9]

Целесообразность восстановления конструкции посредством ремонтных работ в большей степени будет определяться в результате испытаний

опытных образцов изделий, не смотря на проводимые заранее расчеты. На сегодняшний день ведутся активные работы, проводятся исследования, направленные на определение и прогнозирование долговечности полимерных композиционных материалов [10], а также на создание экспериментальных установок, предназначенных для исследования долговечности образцов из ПКМ, в частности, используемых при изготовлении и ремонте надстроек судов. [11]

В заключении следует обратить внимание на то, что проблемы применения ПКМ в отечественном судостроении связаны с разрозненностью и недостаточностью заполнения справочно-нормативной информации по материалам и трудоемкости, каждое предприятие имеет свои справочники, которые не согласованы между собой. При решении этих сложностей основной представляется задача сбора, анализа и систематизации нормативно-справочной информации для судостроения и смежных областей промышленности.

### Литература

1. Бурмистров, Е. Г. Стеклопластики как альтернатива металлам в судоремонте / Е. Г. Бурмистров, Т. А. Михеева // Научные проблемы водного транспорта. – 2021. – № 68. – С. 15-27. – DOI 10.37890/jwt.vi68.202. – EDN CNYUKE;
2. Емельянов, М. Д. Применение композиционных материалов при ремонте корпусов морских судов / М. Д. Емельянов, Э. В. Соминская // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2017. – № 48-49. – С. 77-84. – EDN ZULPOJ;
3. Штагер, Е. А. Физические основы стелс-технологии / Е. А. Штагер. – Санкт-Петербург: ООО "Издательство ВВМ", 2013. – 279 с. – ISBN 978-5-9651-0669-1. – EDN TKXGVF.
4. Францев, М. Э. Проектный анализ водоизмещающих однокорпусных противоминных кораблей из композиционных материалов / М. Э. Францев // Композитный мир. – 2020. – № 4(91). – С. 58-65. – EDN RUPMZK;
5. Хмара, Д. С. Основы современного планирования организационно-технологических процессов в судостроении / Д. С. Хмара, А. В. Фирсова, М. А. Шальнов // Судостроение. – 2022. – № 2(861). – С. 53-56. – EDN IPUAQK;

6. Дерусова, Д. А. Резонансная ультразвуковая лазерная виброметрия разнородных дефектов в стеклопластике / Д. А. Дерусова, В. П. Вавилов // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 12. – С. 24-28. – DOI 10.14489/td.2019.12.pp.024-028. – EDN CXAYHX;
7. Димитриенко, Ю. И. Численное моделирование деформирования и прочности трехслойных композитных конструкций с дефектами / Ю. И. Димитриенко, Ю. В. Юрин, Н. Н. Федонюк // Математическое моделирование и численные методы. – 2016. – № 3(11). – С. 3-23. – EDN WXGSOV;
8. Федонюк, Н. Н. Нормирование прочности и жесткости балок набора судового корпуса из полимерных композиционных материалов / Н. Н. Федонюк // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – № 3(389). – С. 29-36. – DOI 10.24937/2542-2324-2019-3-389-29-36. – EDN XDIWND;
9. Ераносян К. С. Исследование прочности восстановленного после повреждения корпуса корабля из полимерных композиционных материалов / О. Г. Ефимова, Е. А. Маслич, Н. Н. Федонюк // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – № S1. – С. 202-207. – DOI 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-202-207. – EDN VFJSYV;
10. Яковлев, Н. О. Критерии повреждаемости для прогнозирования остаточной усталостной долговечности ПКМ / Н. О. Яковлев, А. Н. Давыденко, А. Д. Монахов // Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: Материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов "ТестМат", Москва, 25 марта 2022 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", 2022. – С. 240-249. – EDN CGHUNE;
11. Саламех, А. Экспериментальная установка для исследования долговечности материала судовых надстроек / А. Саламех, М. Алсаид, В. А. Петровский // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 264-271. – DOI 10.21821/2309-5180-2022-14-2-264-271. – EDN KTVOQI.

#### References

1. Burmistrov, E. G. Fiberglass as an alternative to metals in ship repair / E. G. Burmistrov, T. A. Mikheeva // Scientific problems of water transport. – 2021. – No. 68. – Pp. 15-27. – DOI 10.37890/jwt.vi68.202. – EDN CNYYYKE;
2. Emelyanov, M. D. The use of composite materials in the repair of marine hulls / M. D. Emelyanov, E. V. Sominskaya // Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping. – 2017. – No. 48-49. – Pp. 77-84. – EDN ZULPOJ;
3. Shtager, E. A. Physical foundations of stealth technology / E. A. Shtager. – Saint Petersburg: LLC "VVM Publishing House", 2013. – 279 p. – ISBN 978-5-9651-0669-1. – EDN TKXGVF;
4. Frantsev, M. E. Design analysis of displacement single-hull mine ships made of composite materials / M. E. Frantsev // Composite world. – 2020. – № 4(91). – Pp. 58-65. – EDN PUPMZZ;
5. Khmara, D. S. Fundamentals of modern planning of organizational and technological processes in shipbuilding / D. S. Khmara, A.V. Firsova, M. A. Shalnov // Shipbuilding. – 2022. – № 2(861). – Pp. 53-56. – EDN IPUAQK;
6. Derusova, D. A. Resonant ultrasonic laser vibrometry of heterogeneous defects in fiberglass / D. A. Derusova, V. P. Vavilov // Control. Diagnostics. – 2019. – No. 12. – pp. 24-28. – DOI 10.14489/td.2019.12.pp.024-028. – EDN CXAYHX;
7. Dimitrienko, Yu. I. Numerical modeling of deformation and strength of three-layer composite structures with defects / Yu. I. Dimitrienko, Yu. V. Yurin, N. N. Fedonyuk // Mathematical modeling and numerical methods. – 2016. – № 3(11). – Pp. 3-23. – EDN WXGSOV;
8. Fedonyuk, N. N. Rationing of strength and rigidity of beams of a set of ship's hull made of polymer composite materials / N. N. Fedonyuk // Proceedings of the Krylov State Scientific Center. – 2019. – № 3(389). – Pp. 29-36. – DOI 10.24937/2542-2324-2019-3-389-29-36. – EDN XDIWND;
9. Yeranosyan K. S. The study of the strength of a ship's hull made of polymer composite materials restored after damage / O. G. Efimova, E. A. Maslich, N. N. Fedonyuk // Proceedings of the Krylov State Scientific Center. – 2019. – No. S1. – pp. 202-207. – DOI 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-202-207. – EDN VFJSYV;
10. Yakovlev, N. O. Criteria of damage to predict the residual fatigue durability of PCM / N. O. Yakovlev, A. N. Davydenko, A.D. Monakhov // Physico-mechanical tests, strength and reliability of modern structural and functional materials: Materials of the XIV All-Russian Conference on testing and research of properties of materials "TestMat", Moscow, March 25, 2022. – Moscow: All-Russian Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center "Kurchatov Institute", 2022. – pp. 240-249. – EDN CGHUNE;
11. Salameh, A. Experimental installation for the study of the durability of the material of ship superstructures / A. Salameh, M. Alsaïd, V. A. Petrovsky // Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet. – 2022. – Vol. 14. – No. 2. – pp. 264-271. – DOI 10.21821/2309-5180-2022-14-2-264-271. – EDN KTVOQI.

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

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

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

**Алексей Сергеевич Бачев**, бакалавр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3, e-mail: battarius@hotmail.com

**Alexey S. Bachev**, bachelor, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: battarius@hotmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 31.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 09.08.2022.

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

Научная статья

УДК 621.438

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.014>

### Эффективность комбинированных газотурбинных установок на частичных нагрузках

А.В. Дологлонян<sup>1</sup> [dologlonyan@mail.ru](mailto:dologlonyan@mail.ru), В.Т. Матвеев<sup>1</sup> [mvt3900@mail.ru](mailto:mvt3900@mail.ru),

А.Г. Клименко<sup>1</sup> [kag195877@gmail.com](mailto:kag195877@gmail.com)

<sup>1</sup>Институт природно-технических систем

**Аннотация.** Комбинированные установки на базе газотурбинных двигателей (ГТД) и установок органического цикла Ренкина (ОЦР) морского, подводного и наземного базирования часто работают на переменных нагрузках в зависимости от условий эксплуатации. Поэтому необходимо оценить их энергоэффективность для различных схем ГТД, ОЦР и рабочих тел на частичных нагрузках. Предметом рассмотрения в статье является исследование влияния схем ГТД, ОЦР и рода рабочего тела на эффективность комбинированных микрогазотурбинных установок при работе на частичных нагрузках. Установлено, что наиболее эффективной схемой комбинированной микрогазотурбинной установки (МГТУ) во всем диапазоне мощностей является комбинация микрогазотурбинного двигателя (МГТД) на базе простого цикла с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией и регенеративной установки ОЦР. Показано, что характер изменения относительных параметров комбинированной МГТУ определяется в большей степени базовой схемой МГТД, а также родом рабочего тела установки ОЦР. Определено, что наиболее предпочтительным рабочим телом ОЦР в составе МГТУ для большинства схем ГТД является хладагент R-123.

**Ключевые слова:** микрогазотурбинный двигатель, органический цикл Ренкина, регенерация теплоты, рабочее тело, утилизация теплоты, частичные нагрузки, турбокомпрессорный утилизатор.

**Для цитирования:** Дологлонян А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г. Эффективность комбинированных газотурбинных установок на частичных нагрузках, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 109—117.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.014>

### Efficiency of the combined gas turbine plants at partial loads

Andrey V. Dologlonyan<sup>1</sup> [dologlonyan@mail.ru](mailto:dologlonyan@mail.ru), Valeriy T. Matviienko<sup>1</sup> [mvt3900@mail.ru](mailto:mvt3900@mail.ru),

Alexandr G. Klimenko<sup>1</sup> [kag195877@gmail.com](mailto:kag195877@gmail.com)

<sup>1</sup>Institute of Nature and Technical Systems

**Abstract.** Combined based based on gas turbine engines (GTE) and organic Rankine cycle plants (ORC) of marine, underwater and land-based often operate at variable loads depending on operating conditions. Therefore, it is necessary to evaluate their energy efficiency for various schemes of GTE, ORC and working fluids at partial loads. The subject of consideration in the article is the study of the influence of GTE schemes, ORC and the type of working fluid on the efficiency of combined microgas turbine plants when operating at partial loads. It has been established that the most efficient scheme of a combined microgas turbine plant (MGTP) in the entire power range is a combination of a microgas turbine engine (MGTE) based on a simple cycle with a turbocharge utilizer and regeneration and an ORC regenerative unit. It is shown that the nature of the change in the relative parameters of the combined MGTP is determined to a greater extent by the basic scheme of the MGTE, as well as by the type of the working fluid of the ORC unit. It has been determined that the most preferred working fluid of the ORC as part of the MSTP for most gas turbine engine schemes is the R-123 refrigerant.

**Key words:** micro gas turbine engine, organic Rankine cycle, regeneration, working fluid, heat recovery, partial loads, turbocharger utilizer.

**For citation:** Andrey V. Dologlonyan, Valeriy T. Matviienko, Alexandr G. Klimenko, Efficiency of the combined gas turbine plants at partial loads, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 109—117.

#### Введение

Среди современных транспортных двигателей с внешним подводом теплоты весомую долю получили газотурбинные двигатели (ГТД). Их основные преимущества – высокая удельная мощность, экологичность, возможность работы на практически

любых видах жидких и газообразных топлив, в замкнутых системах. Основным недостатком ГТД является меньший (по сравнению с ДВС) КПД, что ограничивает расширение области их применения в составе силовых установок водного, подводного и наземного базирования.

Повысить КПД ГТД можно двумя способами:

- повышение эффективности элементов ГТД (компрессор, турбина, камера сгорания), что позволит, кроме всего прочего поднять и параметры цикла (температура, давление);

- применение сложных циклов с глубокой утилизацией теплоты.

Представляют практический интерес комбинированные установки, в которых могут быть реализованы основные потенциальные возможности ГТД. Для утилизации теплоты уходящих газов часто применяется цикл Ренкина с альтернативными рабочими телами мощностью от 50 кВт [1], в качестве которых обычно используются органические вещества (класс соединений, в состав которых входит углерод, за исключением карбидов, карбонатов, оксидов углерода и цианидов), с более низкой, чем у воды, температурой кипения при нормальных условиях.

Поскольку работа энергетических установок как водного, подводного, так и наземного базирования часто осуществляется на частичных нагрузках в зависимости от условий эксплуатации, то необходимо определить их энергоэффективность для различных рабочих тел на частичных нагрузках.

#### Базовые схемы ГТД, работающих на органическом топливе

Микрогазотурбинные двигатели (МГТД) могут находить применение для энергообеспечения локальных объектов, как стационарных, технологических так и транспортных подводных и надводных объектов. За основу базовой схемы МГТД принят ГТД простого цикла (см. рис. 1), который можно усложнить с целью увеличения КПД. При этом ГТД простого цикла является одновальным с блокированной турбиной для привода электрогенератора.

Усложнение ГТД простого цикла (ПЦ) предлагается рассмотреть за счет:

- регенерации теплоты выхлопных газов в рабочем цикле двигателя;
- применения цикла перерасширения рабочего тела за силовой турбиной [2-5] с целью повышения мощности ГТД;
- применение комбинации предыдущих методов.

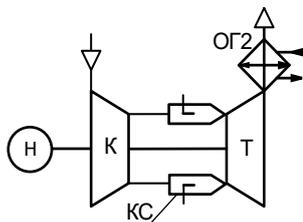


Рис. 1. Схема когенерационной МГТУ ПЦ: К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка

На рисунке 2 изображена схема газотурбинной установки с регенерацией теплоты (ПЦ+Р), в которой по отношению к схеме ГТУ простого цикла добавлен теплообменник-регенератор для подогрева рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя, который позволит повысить КПД самого двигателя.

На рисунке 3 изображена схема МГТУ с турбиной перерасширения. Турбина перерасширения,

приводящая дожимающий компрессор (ДК) с охладителем газа (ОГ1) между ними, который выполняет роль котла-утилизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

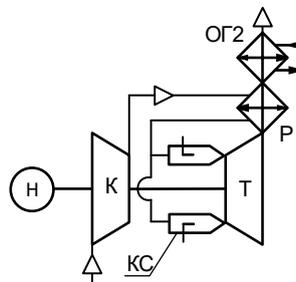


Рис. 2. Схема когенерационной МГТУ ПЦ с регенерацией (Р): Р – регенератор; остальные обозначения такие же, что и на рис. 1

Повышение КПД МГТД возможно также за счет глубокой утилизации теплоты выхлопных газов двигателя, превратив часть ее в механическую работу. Такую задачу возможно решить за счет комбинации двух способов повышения экономичности МГТД, а именно, за силовой турбиной МГТД установить турбокомпрессорный утилизатор, а регенератор встроить между турбиной перерасширения и дожимающим компрессором. На рисунке 4 изображена схема МГТД с ТКУ и регенерацией теплоты. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия. Охладитель ОГ1 может выполнять функции котла-утилизатора для обеспечения объекта теплотой.

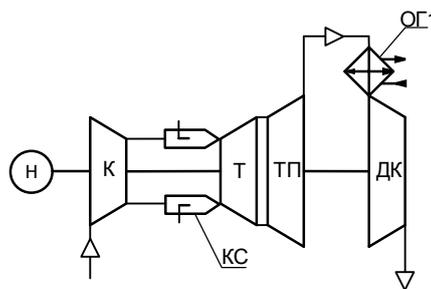


Рис. 3. Схема когенерационной МГТУ ПЦ+ТКУ: ТП – турбина; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор

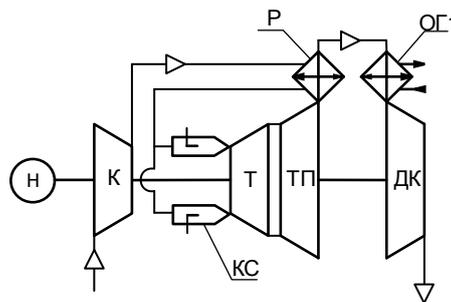


Рис. 4. Схема когенерационной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р: обозначения такие же, что и на рис. 1-3

**Методика и результаты исследования характеристик усложненных ГТД на номинальном режиме**

Исследование характеристик рабочих циклов МГТД при работе на номинальном режиме производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров в ГТУ, приведенных в работе [2].

В настоящее время в микрогазотурбинной технике достигнуты значительные успехи в области повышения эффективности ее элементов [6, 7]. В микрогазотурбинных установках необходимо учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [6-9]. Так КПД компрессора находится в пределах 82...86 %, охлаждаемой турбинной ступени  $\eta_T = 84...86 \%$ , неохлаждаемой турбины достигает 88...90 % при  $\pi_k = 2...6$ . Начальная температура газа

$T_3$  в микротурбине имеет значение от 1173 до 1373 К, при этом турбинная ступень высокого давления может быть неохлаждаемой. Для МГТУ характерно наличие теплообменных аппаратов, которые должны обеспечивать требуемые параметры рабочего тела в цикле, но при этом иметь оптимальные потери давления и, соответственно, габаритные размеры для микротурбинных установок. Так при применении регенератора, габариты которого существенно зависят от конструкции теплообменной матрицы, ее плотности и площади поверхности теплопередачи, для микротурбины оптимальная степень регенерации зависит от гидравлического сопротивления регенератора и давления рабочей среды по каждой из теплообменивающихся сторон [10].

Для моделирования установок, изображенных на рисунках 1-4, были приняты параметры, представленные в таблице 1. Параметры циклов МГТД, работающих по схемам, приведенным на рисунках 1-4 и таблице 1, представлены в таблице 2.

Таблица 1

Параметры МГТУ

Наименование параметра	Ед. измерения	Численное значение
Адиабатный КПД турбины	–	0,88
Адиабатный КПД компрессора	–	0,8
Адиабатный КПД турбины перерасширения <sup>1</sup>	–	0,9
Адиабатный КПД дожимающего компрессора <sup>2</sup>	–	0,88
КПД камеры сгорания	–	0,97
КПД электрогенератора	–	0,96
Плотность матрицы регенератора	М <sup>2</sup> /М <sup>3</sup>	164
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+Р <sup>3</sup>	–	$\varepsilon_e = \left(1 + c_e \frac{r}{1-r}\right)^{-1}$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+ТКУ+Р <sup>3</sup>	–	$\varepsilon_e = \frac{1}{2c_e \varepsilon_{oe1}^2 \pi_{ок}^2} \frac{1-r}{r} \left( \sqrt{1 + 4c_e \varepsilon_{oe1}^2 \pi_{ок}^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны воздуха <sup>3</sup>	–	$\varepsilon_e = 1 - c_e \frac{r}{1-r}$
Коэффициент восстановления давления на входе в установку, $\varepsilon_{ex}$	–	0,97
Коэффициент восстановления давления в КС, $\varepsilon_{кс}$	–	0,97
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{вых}$	–	0,97
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{oe1}, \varepsilon_{oe2}$	–	0,96
Температура газов на выходе из ОГ1 и ОГ2	К	323
Температура окружающего воздуха	К	288
Влажность окружающего воздуха	%	60

**Результаты исследования характеристик МГТУ на частичных нагрузках**

Анализ характеристик циклов МГТУ на частичных нагрузках производился на генераторном режиме (при постоянном числе оборотов) с заблокированной силовой турбиной и свободным ТКУ согласно методам, предложенным в работах [3, 11, 12] и опробованных в работах [13-15]. Генераторный режим является типичным для подводных и надводных судов с электродвижением, а также других локальных объектов. Результаты исследования эффективности ( $\eta_e$ ) МГТД на частичных нагрузках представлены на рис. 5.

Анализ рисунка 5 показывает, что эффективность схем МГТД, изображенных на рис 1-4 и представленных в табл. 2, распределяется без изменений и на частичных нагрузках. Наименьшее снижение эффективности при уменьшении нагрузки обеспечивает схема ПЦ+ТКУ.

**Результаты исследования характеристик комбинированных МГТУ на частичных нагрузках**

Для моделирования комбинированных установок были приняты параметры установок ОЦР, представленные в таблице 3. В качестве парогенераторов использованы прямоточные котлы основными преимуществами которых являются:

компактность, быстрое включение в работу, малое время нагрева рабочего тела и переход с режима на режим. Это очень важно, т.к. дает возможность регулирования производительности путем включения / отключения установки ОЦР в составе комбинированной МГТУ.

В качестве теплоносителя было принято термальное масло Даутерм, свойства которого описаны в [16]. Свойства рабочих тел взяты в [17] (см. табл. 4). Схемы комбинированных МГТУ на базе МГТД, представленных на рис. 1-4, и установок ОЦР без регенерации и с регенерацией показаны на рисунках 6-13 соответственно.

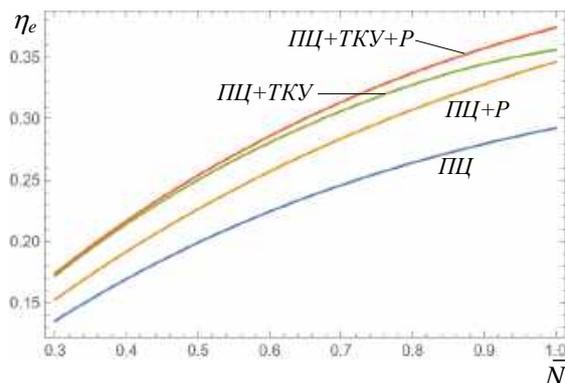


Рис. 5. Зависимость КПД МГТД, изображенных на рис. 1-4, от относительной нагрузки  $N$

Таблица 2

Параметры МГТД на номинальном режиме при  $T_3 = 1373$  К

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	29,2	35,4	35,6	37,4
Температура газов на выходе из турбины	К	759	961	610	865
Температура газов на входе в парогенератор ОЦР	К	759	597	610	580
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	21	6,4	14,4	5,3
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	3,5	1,8
Оптимальная степень регенерации, $r$	–	–	0,875	–	0,83
Удельная мощность на валу силовой турбины	кВт/кг	219	187	308	244
Удельная тепловая мощность	кВт/кг	451	280	300	263
КПД теплотехнический	%	88	85	70	76

Таблица 3

Параметры установок ОЦР

Наименование параметра	Ед. измерения	Численное значение
Адиабатный КПД турбины	–	0,82
КПД насоса	–	0,78
Коэффициент восстановления давления в парогенераторе	–	0,92
Коэффициент восстановления давления в конденсаторе	–	0,96
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике	–	0,96
Степень регенерации	–	0,9
Максимальный температурный напор на выходе из пароперегревателя ( $\Delta T_1$ )	К	50
Минимальный температурный напор на выходе из испарительного участка ( $\Delta T_2$ )	К	15
Температура конденсации	К	308,15
Кратность циркуляции рабочего тела	–	1

Таблица 4

Некоторые свойства рабочих тел, использованных в этой работе

Обозначение рабочего тела	Молекулярный вес	Критическое давление, МПа	Критическая температура, К
R-717 (аммиак)	17,03	11,33	405,4
R-718 (вода)	18	22,06	647,3
R-123	152,93	3,66	456,83
R-1233zd	130,5	3,57	438,75

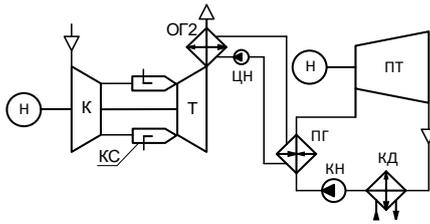


Рис. 6. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ и ОЦР: ПТ – паровая турбина; КД – конденсатор; КН – конденсатный насос; ПГ – парогенератор; ЦН – циркуляционный насос; остальные обозначения, как на рис. 1

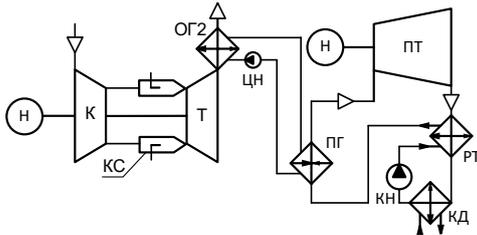


Рис. 7. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ и ОЦР с регенерацией: РТ – регенеративный теплообменник; остальные обозначения, как на рис. 1 и 6

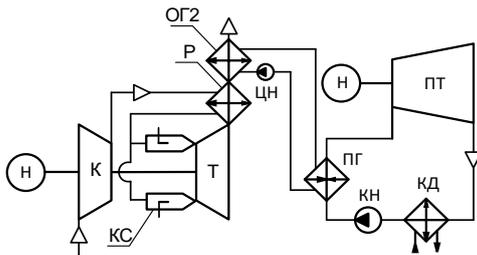


Рис. 8. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+Р и ОЦР: остальные обозначения, как на рис. 2 и 6

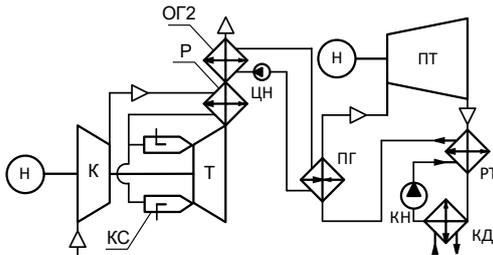


Рис. 9. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+Р и ОЦР с регенерацией: остальные обозначения, как на рис. 2 и 7

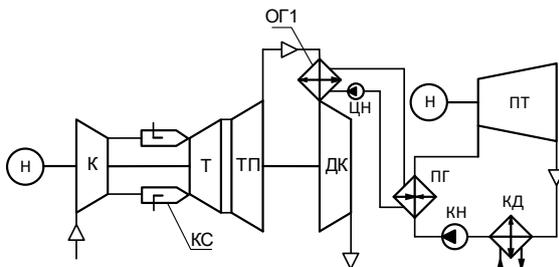


Рис. 10. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ и ОЦР: остальные обозначения, как на рис. 3 и 6

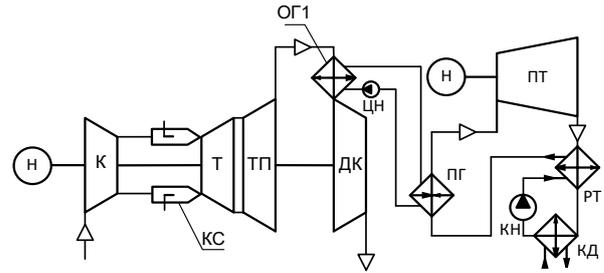


Рис. 11. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ и ОЦР с регенерацией: остальные обозначения такие же как на рис. 3 и 7

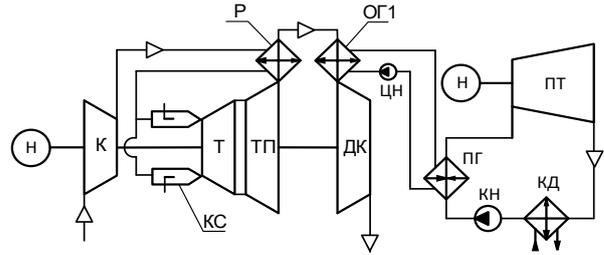


Рис. 12. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р и ОЦР: остальные обозначения такие же, как на рис. 4 и 6

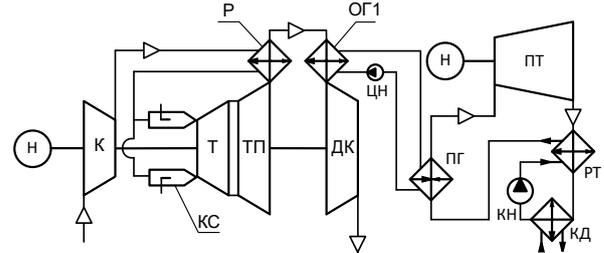


Рис. 13. Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р и ОЦР с регенерацией: остальные обозначения такие же, как на рис. 4 и 7

Анализ характеристик установок ОЦР на частичных нагрузках производился на генераторном режиме (при постоянном числе оборотов) согласно методу, предложенному в работе [18]. Результаты исследования комбинированных МГТУ на частичных нагрузках с регенеративной установкой ОЦР на R-1233zd и R-123 (в случае много агрегатной установки распределение общей нагрузки считается параллельной) представлены на рис. 14 и 15.

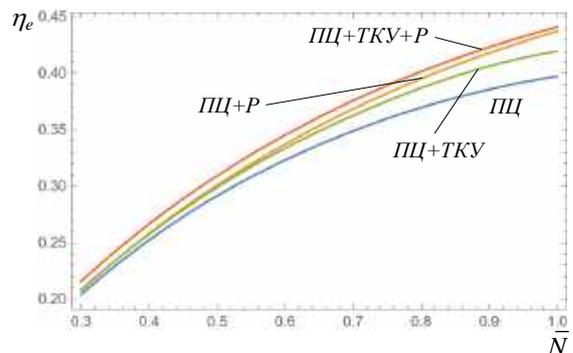


Рис. 14. Зависимость КПД комбинированных МГТУ, изображенных на рис. 7, 9, 11, 13, от относительной нагрузки с регенеративной ОЦР на R-1233zd

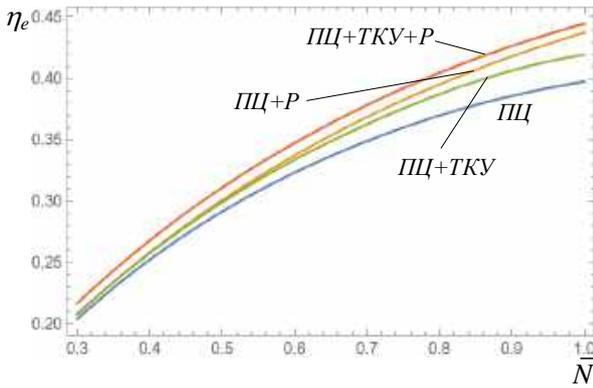


Рис. 15. Зависимость КГД комбинированных МГТУ, изображенных на рис. 7, 9, 11, 13, от относительной нагрузки с регенеративной установкой ОЦР на R-123

Рисунки 14 и 15 показывают, что комбинация схемы ГТД ПЦ+Р и установки ОЦР дает больший эффект на номинальном режиме, чем комбинация на базе ПЦ+ТКУ поскольку удельная мощность схемы ПЦ+Р существенно меньше а температуры на входе в парогенератор установки ОЦР, а следовательно и удельные мощности паровых турбин примерно одинаковы. Однако, согласно рис. 5 ГТД на базе ПЦ+ТКУ теряет эффективность с понижением нагрузки существенно медленнее, чем схема ПЦ+Р, и по достижении определенного значения относительной нагрузки (в зависимости от рода рабочего тела ОЦР) ситуация может меняться на противоположную (см. рис. 14 и 15 при относительных нагрузках меньше 0,35).

Также рисунки 14 и 15 наглядно иллюстрируют, что комбинированные МГТУ обеспечивают более высокую эффективность во всем диапазоне изменения нагрузки по сравнению с МГТД (см. рис. 5).

На рисунках 16-19 показаны зависимости относительных параметров МГТУ – относительной температуры на входе в парогенератор ОЦР ( $\bar{T}_4$ ), относительной удельной мощности МГТД ( $\bar{N}_{em}$ ) и относительной удельной мощности паровой турбины установки ОЦР ( $\bar{N}_{nm}$ ) от относительного расхода рабочего тела МГТД ( $\bar{G}$ ).

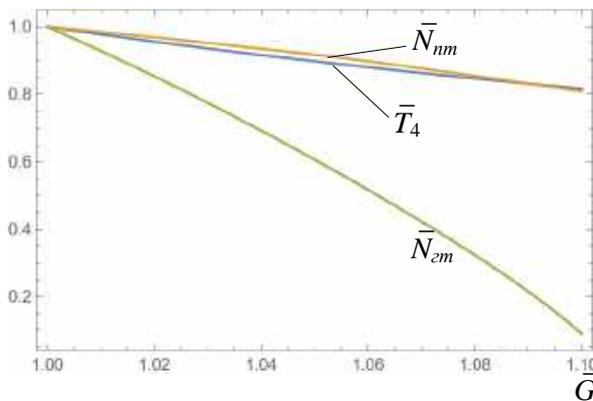


Рис. 16. Зависимость относительных параметров комбинированной МГТУ (см. рис. 7), на базе ПЦ, от относительного расхода с регенеративной установкой ОЦР на R-123

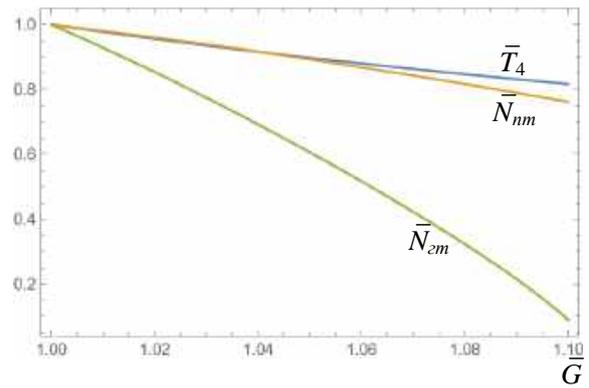


Рис. 17. Зависимость относительных параметров комбинированной МГТУ (см. рис. 6), на базе ПЦ, от относительного расхода с установкой ОЦР на R-123

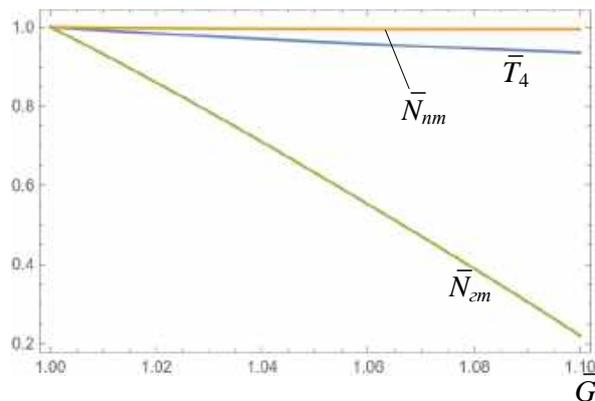


Рис. 18 – Зависимость относительных параметров комбинированной МГТУ (см. рис. 9), на базе ПЦ+Р, от относительного расхода с регенеративной установкой ОЦР на R-123

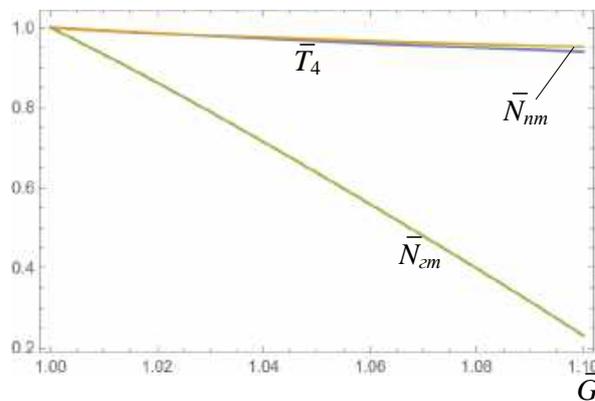


Рис. 19. Зависимость относительных параметров комбинированной МГТУ, на базе ПЦ+Р (см. рис. 9), от относительного расхода с установкой ОЦР на R-717

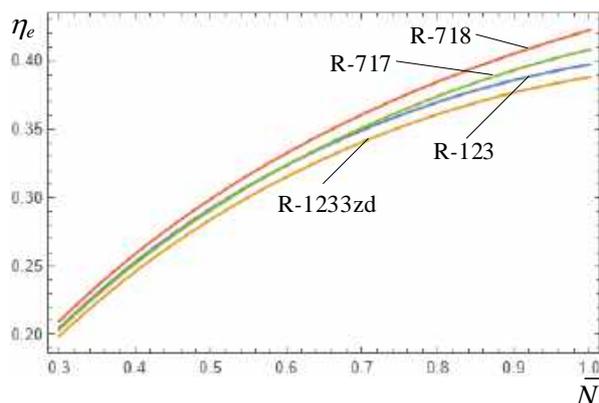


Рис. 20. Зависимость эффективности комбинированной МГТУ, на базе ПЦ, от рода рабочего тела установки ОЦР

Анализ рисунков 16-19 показывает, что характер изменения относительных параметров определяется в большей степени базовой схемой МГТД, а также родом рабочего тела установки ОЦР. Также можно сказать, что относительные параметры установки ОЦР ( $\bar{T}_4$  и  $\bar{N}_{nm}$ ) на частичных нагрузках меняются значительно меньше относительная мощность МГТД. Это обеспечивает, в свою очередь, повышенную эффективность комбинированной МГТУ относительно базовой на малых мощностях. Кроме того, для «пологих» изодромов (см., например [19]) характерных для центробежных компрессоров, некоторые рабочие тела установок ОЦР позволяют поддерживать мощность паровой турбины практически постоянной. Это связано с тем, что снижение температуры на входе в парогенератор установки ОЦР компенсируется ростом расхода рабочего тела МГТД (см. рис. 18).

Влияние рода рабочего тела установки ОЦР на эффективность МГТУ представлены на рисунках 20-23.

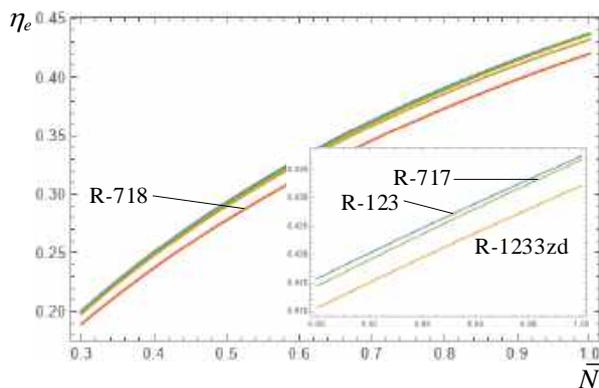


Рис. 21. Зависимость эффективности комбинированной МГТУ, на базе ПЦ+Р, от рода рабочего тела установки ОЦР

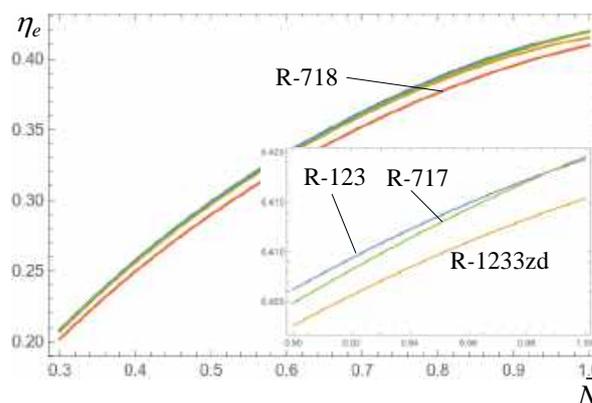


Рис. 22 – Зависимость эффективности комбинированной МГТУ, на базе ПЦ+ТКУ, от рода рабочего тела установки ОЦР

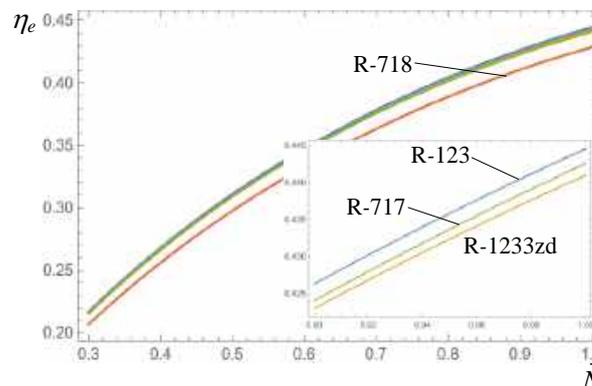


Рис. 23. Зависимость эффективности комбинированной МГТУ, на базе ПЦ+ТКУ+Р, от рода рабочего тела установки ОЦР

Анализ рисунков 20-23 показывает, что во всех базовых схемах кроме ПЦ наиболее предпочтительным для установок ОЦР является R-123. Следующим по эффективности после R-123 является аммиак, который значительно дешевле и экологичнее своего оппонента, при этом разница в эффективности не существенна особенно для МГТД без регенерации. Очевидно, что более высокая температура на входе в установку ОЦР, которую обеспечивает МГТД на базе ПЦ (см. табл. 2), оказывается предпочтительнее для использования «влажных» [20] рабочих тел.

### Заключение

1. Наиболее эффективной комбинированной МГТУ во всем диапазоне мощностей является комбинация МГТД на базе ПЦ+ТКУ+Р и регенеративной установки ОЦР.
2. Показано, что характер изменения относительных параметров комбинированной МГТУ определяется в большей степени базовой схемой МГТД, а также родом рабочего тела установки ОЦР.
3. Установлено, что наибольшей эффективности достигают комбинированные МГТУ, использующие R-123 в качестве рабочего тела для установки ОЦР, кроме МГТУ на базе ПЦ. Кроме того, R-123 более «устойчив» (см. рис. 20 и 22) к снижению нагрузки.

### Литература

1. Kuo, Chi-Ron & Hsu, Sung-Wei & Chang, Kai-Han & Wang, Chi-Chuan, 2011. "Analysis of a 50kW organic Rankine cycle system," Energy, Elsevier, vol. 36(10), pages 5877-5885.
2. Матвеев В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19. № 4-5. С. 81-85.
3. Matviienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas turbine engines with overexpansion turbine / V. Matviienko, V. Ocheretianiy // Prococoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
4. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianiy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
5. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianiy // Prococoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
6. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines ():V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
7. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
8. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
9. Арбеков А.Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / А.Н. Арбеков, А.Ю. Варакин, Э.А. Мнушин, В.Е и др. М. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 678 с.
10. Дологлонян А.В. Оптимизация степени регенерации для циклов газотурбинных установок с кожухотрубными регенераторами / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. № 4 (348). С. 19-27.
11. Матвеев В.Т. Теплотехнические характеристики когенерационных газотурбогенераторов с регенерацией теплоты при переменном режиме работы // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Харьков: НАУ «ХАИ», 2001 Вып. 23 С. 95-98.
12. Переходные процессы в газотурбинных установках / Под ред. д-ра техн. наук, проф. И. В. Котляра. Л.: Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1973. 254 с.
13. Матвеев В.Т. Переменные режимы работы замкнутых газотурбинных установок в пропульсивных комплексах подводной техники / В.Т. Матвеев, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный, // Морские интеллектуальные технологии. СПб.: НИЦ МИТ, 2020. № 3(49). Т.1. С. 77-83.
14. Матвеев В.Т. Эксплуатация на переменных режимах замкнутых микрогазотурбинных установок с окислителем кислородом для подводной техники / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный, А.В. Дологлонян // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2020. Вып. № 4. С. 757-763.
15. Матвеев В.Т. Управление характеристиками замкнутых газотурбинных установок пропульсивных комплексов подводных судов / В.Т. Матвеев, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный // Морские интеллектуальные технологии. СПб.: НИЦ МИТ, 2021. № 4 (54) Т.1. С. 71-75.
16. НЕО кемикал [Электронный ресурс]. URL: [http://neochemical.ru/File/DOWTHERM\\_A\\_TDS\\_Russian.pdf](http://neochemical.ru/File/DOWTHERM_A_TDS_Russian.pdf)
17. NIST [Электронный ресурс]. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
18. Дологлонян А.В. Оценка эффективности установок органического цикла Ренкина на частичных нагрузках при работе на различных рабочих телах / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев, А.Г. Клименко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. № 2 (352). С. 9-18.
19. Менжицкий А.Д. Турбокомпрессоры систем наддува судовых дизелей. Л.: Судостроение, 1986. 246 с.
20. Дологлонян А.В. Выбор рабочего тела и оптимизация параметров органического цикла Ренкина / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. № 5 (337). С. 139-151.

### References

1. Kuo, Chi-Ron & Hsu, Sung-Wei & Chang, Kai-Han & Wang, Chi-Chuan, 2011. "Analysis of a 50kW organic Rankine cycle system," Energy, Elsevier, vol. 36(10), pages 5877-5885.
2. Matveenko V.T. Glubokaya utilizatsiya teploty v gazoturbinnnykh dvigatelayakh s turbinoy pererasshireniya [Deep heat recovery in gas turbine engines with an overexpansion turbine], V.T. Matveenko. Promyshlennaya teplotekhnika. 1997. T. 19, № 4-5. S. 81-85.
3. Matviienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas turbine engines with overexpansion turbine, V. Matviienko, V. Ocheretianiy. Prococoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
4. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex, V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianiy. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
5. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianiy // Prococoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.

6. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines ():V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
7. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
8. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
9. Arbekov A.N. Teoriya i proektirovanie gazoturbinykh i kombinirovannykh ustanovok [Theory and design of gas turbine and combined plants], A.N. Arbekov, A.Yu. Varaksin, E.A. Mnushin, V.E i dr. – M. Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2017. 678 s.
10. Dologlonyan A.V. Optimizatsiya stepeni regeneratsii dlya tsiklov gazoturbinykh ustanovok s kozhukhotrubnymi regeneratoryami [Optimization of the regeneration degree for cycles of gas turbine plants with shell-and-tube regenerators], A.V. Dologlonyan, V.T. Matviienko, V.A. Ocheretyanyy. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. № 4 (348). S. 19-27.
11. Matviienko V.T. Teplotekhnicheskie kharakteristiki kogeneratsionnykh gazoturbogeneratorov s regeneratsiey teploty pri peremennom rezhime raboty [Thermotechnical characteristics of cogeneration gas turbine generators with heat regeneration in variable operation mode] // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya: sb. nauch. tr. Khar'kov: NAU «KhAI», 2001 Vyp. 23 S. 95-98.
12. Perekhodnye protsessy v gazoturbinykh ustanovkakh [Transient processes in gas turbine plants]. Pod red. d-r-a tekhn. nauk, prof. I. V. Kotlyara. Leningrad: Mashinostroenie. [Leningr. otd-nie], 1973. 254 s.
13. Matviienko V.T. Peremennye rezhimy raboty zamknutykh gazoturbinykh ustanovok v propul'sivnykh kompleksakh podvodnoy tekhniki [Variable modes of operation of closed gas turbine plants in propulsion complexes of underwater equipment], V.T. Matviienko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyy, Morskie intellektual'nye tekhnologii. – S.-Peterburg. NITs MIT, 2020. № 3(49), T.1. S. 77-83.
14. Matviienko V.T. Eksploatatsiya na peremennykh rezhimakh zamknutykh mikrogazoturbinykh ustanovok s okislitelem kislorodom dlya podvodnoy tekhniki [Operation in variable modes of closed micro gas turbine plants with oxygen oxidizer for underwater equipment], V.T. Matviienko, V.A. Ocheretyanyy, A.V. Dologlonyan. Vestnik GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2020. Vyp. № 4. S. 757-763.
15. Matviienko V.T. Upravlenie kharakteristikami zamknutykh gazoturbinykh ustanovok propul'sivnykh kompleksov podvodnykh sudov [Controlling the characteristics of submarines propulsion complexes closed gas turbine plants], V.T. Matviienko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyy. Morskie intellektual'nye tekhnologii. S.Peterburg: NITs MIT, 2021. № 4 (54), T.1. S. 71-75.
16. NEO Chemical. URL: [http://neochemical.ru/File/DOWTHERM\\_A\\_TDS\\_Russian.pdf/](http://neochemical.ru/File/DOWTHERM_A_TDS_Russian.pdf/)
17. NIST. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
18. Dologlonyan A.V. Otsenka effektivnosti ustanovok organicheskogo tsikla renkina na chastichnykh nagruzkakh pri rabote na razlichnykh rabochikh telakh [Evaluation of the efficiency of organic Rankine cycle plants at partial loads when operating on various working fluids], A.V. Dologlonyan, V.T. Matviienko, A.G. Klimenko. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2022. № 2 (352). S. 9-18.
19. Menzhitskiy A.D. Turbokompressory sistem nadduva sudovykh dizeley [Turbochargers for pressurization systems of marine diesel engines]. L.: Sudostroenie, 1986. 246 s.
20. Dologlonyan A.V. Vybór rabocheho tela i optimizatsiya parametrov organicheskogo tsikla Renkina [Selection of the working fluid and optimization of the organic Rankine cycle parameters], A.V. Dologlonyan, V.T. Matviienko. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2019. № 5 (337). S. 139-151.

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

**Андрей Вартазарович Дологлонян**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28, e-mail: [dologlonyan@mail.ru](mailto:dologlonyan@mail.ru)

**Andrey V. Dologlonyan**, Ph.D. (Eng), assistant professor, Leading Researcher, chief of laboratory, Institute of Nature and Technical Systems, Lenina St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: [dologlonyan@mail.ru](mailto:dologlonyan@mail.ru)

**Валерий Тимофеевич Матвеев**, доктор технических наук, профессор Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28, e-mail: [mvt3900@mail.ru](mailto:mvt3900@mail.ru)

**Valeriy T. Matviienko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Nature and Technical Systems, Lenina St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: [mvt3900@mail.ru](mailto:mvt3900@mail.ru)

**Александр Георгиевич Клименко**, ведущий инженер, Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28, e-mail: [kag195877@gmail.com](mailto:kag195877@gmail.com)

**Alexander G. Klimenko**, Leading Engineer, Institute of Nature and Technical Systems, Lenina St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: [kag195877@gmail.com](mailto:kag195877@gmail.com)

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.06.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 03.07.2022.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.015>

## Управление безопасностью судовых энергетических установок на основе нечеткой логики

В.А. Туркин<sup>1</sup> [turvla@mail.ru](mailto:turvla@mail.ru), А.А. Стяжкин<sup>1</sup> [sasha-lol12@mail.ru](mailto:sasha-lol12@mail.ru), Е.Ф. Загурский<sup>1</sup> [evgzag82@yandex.ru](mailto:evgzag82@yandex.ru)

<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** Предложено для анализа безопасности эксплуатации судовых энергетических установок использовать не вероятностный, а возможностный подход, основанный на применении теории нечетких множеств. При этом осуществляется замена точечных оценок вероятностей конкретных предпосылок их интервальными оценками, выраженными в форме нечетких чисел. Используя метод нечетких чисел получено, что возможность остановки главного двигателя в ходу судна будет оцениваться диапазоном изменения частоты от 0,0862 до 0,968 при наиболее вероятном ее значении 0,0915 год<sup>-1</sup>. Как показывает статистика катастрофических разливов нефти с танкеров, наиболее опасная ситуация может возникнуть в случае одновременного наличия следующих событий: следование танкера поблизости от берега и наличие штормовой погоды. На основании экспертных оценок установлено, что вероятность движения танкера вблизи берега оценивается значением 0,04, а вероятность наличия штормовой погоды – 0,05. Тогда частота возникновения катастрофической ситуации с танкером вследствие разлива нефти будет равна  $1,83 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>. Имея значение частоты аварий можно оценить величину риска и предложить мероприятия по его снижению, если риск будет превышать приемлемую величину.

**Ключевые слова:** судовые энергетические установки, безопасность эксплуатации, частота отказов, нечеткие числа

**Для цитирования:** Туркин В.А., Стяжкин А.А., Загурский Е.Ф. Управление безопасностью судовых энергетических установок на основе нечеткой логики, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 118—123.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.015>

## Safety management of ship power plants based on fuzzy logic

Vladimir A. Turkin<sup>1</sup> [turvla@mail.ru](mailto:turvla@mail.ru), Alexander A. Styazhkin<sup>1</sup> [sasha-lol12@mail.ru](mailto:sasha-lol12@mail.ru),

Eugene F. Zagurskiy<sup>1</sup> [evgzag82@yandex.ru](mailto:evgzag82@yandex.ru)

<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Krasnodar region, Russian Federation

**Abstract.** It is proposed to use not a probabilistic, but a possibilistic approach based on the application of the theory of fuzzy sets to analyze the safety of operation of ship power plants. In this case, point estimates of the probabilities of specific prerequisites are replaced by their interval estimates expressed in the form of fuzzy numbers. Using the fuzzy number method, it was obtained that the possibility of stopping the main engine during the course of the vessel will be estimated by the frequency change range from 0.0862 to 0.968, with its most probable value being 0.0915 year<sup>-1</sup>. As the statistics of catastrophic oil spills from tankers show, the most dangerous situation can arise in the event of the simultaneous presence of the following events: a tanker moving close to the coast and the presence of stormy weather. Based on expert assessments, it was found that the probability of a tanker moving near the coast is estimated at 0.04, and the probability of stormy weather is 0.05. Then the frequency of occurrence of a catastrophic situation with a tanker due to an oil spill will be equal to  $1.83 \cdot 10^{-4}$  year<sup>-1</sup>. Having the value of the frequency of accidents, it is possible to assess the magnitude of the risk and propose measures to reduce it if the risk exceeds an acceptable value.

**Keywords:** ship power plants, operational safety, failure rate, fuzzy numbers

**For citation:** Vladimir A. Turkin, Alexander A. Styazhkin, Eugene F. Zagurskiy. Safety management of ship power plants based on fuzzy logic, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 118—123.

### Введение

Для проведения анализа безопасности эксплуатации судовых энергетических установок (СЭУ) танкеров на основе оценки риска необходимо наличие достаточного представительных и однородных выборок по отказам основного механического оборудования, входящего в состав СЭУ. Несмотря на имеющуюся статистику отказов по танкерам различных типов ее нельзя в полной мере считать массовой и однородной, как этого требует классический вероятностный подход. Поэтому для

анализа безопасности эксплуатации СЭУ танкеров был использован не вероятностный а возможностный подход, основанный на применении теории нечетких множеств [1]. Необходимость учета приближенной информации вызвана также нестационарностью и неэргодичностью процессов в человеко-машинных системах [2, 3]. Метод требует изменения отношения к интерпретации имеющихся исходных данных, а именно, представление их не точно известными, а приближенными величинами, заданными на некоторых интервалах возможных значений. При этом осуществляется замена

точечных оценок вероятностей предпосылок их интервальными оценками, выраженными в форме нечетких величин и чисел.

Теория нечетких множеств является расширением четкой логики (определяющей значение как 0 или 1) в многомерную форму, такую как нечеткая логика (определяющая значения от 0 до 1) [4]. Теория нечетких множеств помогает количественно справиться с нечеткостью исходных данных по отказам судового механического оборудования, а также с нечеткостью человеческих суждений при использовании экспертных оценок частоты аварий техники [5, 6].

Исследователи использовали теорию нечетких множеств для оценки вероятностей базовых событий во многих прикладных областях [7, 8, 9, 10]. Следует также отметить, что для анализа безопасности эксплуатации судовых энергетических установок может использоваться лазерный метод диагностики состояния судовых технических средств [11], позволяющий выявить на ранней стадии их предрасположенность к возникновению аварий.

### 1. Безопасность и риск

В руководстве Международной организации стандартизации ИСО/МЭК «Общие термины и определения в области стандартизации и смежных видов деятельности» дается следующее определение «Безопасность – это отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения социального, экологического и материального ущерба».

В работе [12] для управления безопасностью введено понятие «Риск» как мера опасности, возможной при разных стратегиях управления. Предлагается следующее определение: риск – мера опасности, характеризующая возможность причинения ущерба и его тяжесть. Это определение включает в себя как частный случай широко применяемые на практике методы исчисления риска как математического ожидания ущерба, возможного в случае реализации нежелательного события (аварии), что близко к подходу, распространенному в отдельных зарубежных научных публикациях.

На основании анализа различных определений и с учетом сложившейся в последнее время в сфере управления техногенной безопасностью практики величина риска может быть рассчитана как произведение частоты нежелательного события на ущерб, вызванный этим событием. Математически данное определение может быть записано в виде следующего выражения [12]:

$$R_A = \lambda_A \cdot Y, \quad (1)$$

где  $R_A$  – величина риска аварии, год<sup>-1</sup> или руб. · год<sup>-1</sup>;  $\lambda_A$  – частота реализации аварии, год<sup>-1</sup>;  $Y$  – ущерб от аварии, без размерности или руб.

Размерность год<sup>-1</sup> используется в том случае, если оценивается риск гибели человека (индивидуальный риск), а размерность руб. · год<sup>-1</sup> – если оценивается риск потери материальных ценностей или экологический риск.

Учитывая, что статистику по частоте отказов элементов судовых энергетических установок нельзя считать массовой и однородной, для дальнейшего анализа безопасности эксплуатации СЭУ был использован не вероятностный а возможностный

подход, основанный на применении теории нечетких множеств.

### 2. Правила проведения алгебраических операций с нечеткими числами

Под нечеткой величиной  $N$  подразумевается подмножество, определяемое на множестве действительных чисел и характеризуемое заданным соответствием между значениями и степенями принадлежности –  $\mu_N$  из интервала [0, 1]. Функция принадлежности значений такой величины –  $\pi(n)$  рассматривается как распределение возможностей появления определенных действительных чисел. Модальными значениями нечеткой величины –  $m_N$  являются те элементы множества, которые обладают единичной степенью принадлежности – наибольшей возможностью наблюдения в рассматриваемых условиях, то есть  $\mu_N(m) = 1$ .

Согласно сформулированному Л. Заде принципу обобщения категорий теории возможностей, на нечеткие числа могут быть распространены алгебраические операции: логические сложение и умножение, а также изменение знака (отрицание), деление и вычитание переменных [1]. Такие преобразования могут быть проведены для любых нечетких чисел с непрерывными функциями принадлежности; однако наиболее просто это достигается при их аппроксимации L-R-типа с использованием выражения:

$$\pi_m(x) = \begin{cases} L \frac{m-x}{\alpha}, & x \leq m, \alpha > 0; \\ R \frac{x-m}{\beta}, & x > m, \beta > 0. \end{cases} \quad (1)$$

где  $m$  – модальное значение числа;  $\alpha, \beta$  – левый и правый коэффициенты размаха;  $L(*), R(*)$  – нечеткие формы левой и правой частей, пересекающиеся над точкой  $m$ .

В качестве примера на рис. 1 показана функция принадлежности нечеткого числа  $M$  в виде треугольника с аналитическим выражением в аппроксимированной L-R-форме.

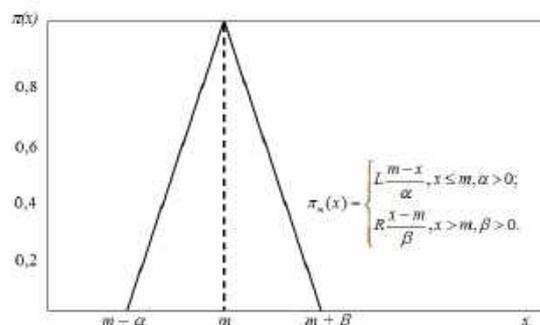


Рис. 1. Задание нечеткого числа в виде треугольника

Обозначим представленные L-R-формой нечеткие числа следующим образом:  $M = (m, \alpha, \beta)_{LR}$  =  $(m, \alpha, \beta)$ .

Тогда необходимые при анализе деревьев отказов выражения для выполнения логических операций сложения и умножения нечетко заданных чисел будут иметь вид [1].

Операция логического сложения – символ операции  $\oplus$  и операция логического умножения – символ операции  $\otimes$  представлены выражениями (2) – (4):

$$(m, \alpha, \beta) \oplus (n, \gamma, \delta)_{LR} = (m + n, \alpha + \gamma, \beta + \delta)_{LR}. \quad (2)$$

$$(m, \alpha, \beta) \otimes (n, \gamma, \delta)_{LR} \cong (m \cdot n, m\gamma + n\alpha + \alpha\gamma, m\delta + n\beta + \beta\delta) \text{ для } \alpha, \beta, \gamma, \delta \rightarrow 0 \text{ и } m > 0, n > 0. \quad (3)$$

$$(m, \alpha, \beta) \otimes (n, \gamma, \delta)_{LR} \cong (m \cdot n, m\gamma + n\alpha - \alpha\gamma, m\delta + n\beta - \beta\delta) \text{ для } \alpha, \beta, \gamma, \delta \gg 0 \text{ и } m > 0, n > 0. \quad (4)$$

Объединение нескольких событий логическим условием "И" дает n-арное преобразование возможности их одновременного появления:

$$\tilde{P}_Y = \prod_{i=1}^n P_i = \tilde{P}_1 \wedge \tilde{P}_2 \wedge \tilde{P}_3 \wedge \dots \wedge \tilde{P}_n, \quad (5)$$

где  $\prod_{i=1}^n P_i$  – знак нечеткого перемножения

параметров возможности;

$$\tilde{P}_Y = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = (m_{P_1}, \alpha_{P_1}, \beta_{P_1}) \otimes (m_{P_2}, \alpha_{P_2}, \beta_{P_2}) \otimes \dots \otimes (m_{P_{n-1}}, \alpha_{P_{n-1}}, \beta_{P_{n-1}}) \otimes (m_{P_n}, \alpha_{P_n}, \beta_{P_n}) \otimes \dots \otimes (m_{r_{i-1}}, m_{r_{i-1}} \alpha_{P_i} + m_{P_i} \alpha_{r_{i-1}}, m_{r_{i-1}} \beta_{P_i} + m_{P_i} \beta_{r_{i-1}})_{i=n}, \quad (6)$$

где  $m_{r_i}, \alpha_{r_i}, \beta_{r_i}$  – рекурсивные члены, рассчитываемые по формулам:

$$m_{r_0} = m_{P_1}; m_{r_1} = m_{P_1} m_{P_2}; m_{r_2} = m_{r_1} m_{P_3}; \dots; m_{r_i} = m_{r_{i-1}} m_{P_{i+1}};$$

$$\alpha_{r_0} = \alpha_{P_1}; \alpha_{r_1} = m_{P_1} \alpha_{P_2} + m_{P_2} \alpha_{P_1}; \alpha_{r_2} = m_{r_1} \alpha_{P_3} + m_{P_3} \alpha_{r_1}; \dots; \alpha_{r_i} = m_{r_{i-1}} \alpha_{P_{i+1}} + m_{P_{i+1}} \alpha_{r_{i-1}};$$

$$\beta_{r_0} = \beta_{P_1}; \beta_{r_1} = m_{P_1} \beta_{P_2} + m_{P_2} \beta_{P_1}; \beta_{r_2} = m_{r_1} \beta_{P_3} + m_{P_3} \beta_{r_1}; \dots; \beta_{r_i} = m_{r_{i-1}} \beta_{P_{i+1}} + m_{P_{i+1}} \beta_{r_{i-1}}.$$

Если заданные нечеткими числами события-предпосылки соединяются в дереве отказов логическим условием "ИЛИ" (n-арное сложении булевых величин), выражение для меры возможности реализации такого узла определяется с помощью формулы де-Моргана [1]:

$$\tilde{P}_Y = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) = \tilde{P}_1 \vee \tilde{P}_2 \vee \tilde{P}_3 \vee \dots \vee \tilde{P}_n, \quad (7)$$

Применение соответствующего правила табл. П3.4 [1] позволяет получить рекурсивную зависимость для данного логического узла:

$$\tilde{P}_Y(x) = (1, 0, 0) - ((1, 0, 0) - (m_{P_1}, \alpha_{P_1}, \beta_{P_1}) \otimes (1, 0, 0) - (m_{P_2}, \alpha_{P_2}, \beta_{P_2}) \otimes \dots \otimes (1, 0, 0) - (m_{P_n}, \alpha_{P_n}, \beta_{P_n})). \quad (8)$$

Из выражения (8) с помощью третьего правила табл. П.3.4 литературы [1] и несложных преобразований получится формула для определения меры возможности появления результирующего события Y:

$$\tilde{P}_Y(x) = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = 1 - (m_{r_{i-1}} (1 - m_{P_i}), m_{r_{i-1}} \alpha_{P_i} + (1 - m_{P_i}) \alpha_{r_{i-1}}, m_{r_{i-1}} \beta_{P_i} + (1 - m_{P_i}) \beta_{r_{i-1}}), \quad (9)$$

где  $m_{r_i}, \alpha_{r_i}, \beta_{r_i}$  – рекурсивные члены, рассчитываемые по формулам:

$$m_{r_0} = m_{P_1}; m_{r_1} = 1 - (1 - m_{P_1})(1 - m_{P_2}); m_{r_2} = 1 - (1 - m_{r_1})(1 - m_{P_3}); \dots; m_{r_i} = 1 - (1 - m_{r_{i-1}})(1 - m_{P_{i+1}});$$

$$\alpha_{r_0} = \alpha_{P_1}; \alpha_{r_1} = (1 - m_{P_1}) \alpha_{P_2} + (1 - m_{P_2}) \alpha_{P_1}; \alpha_{r_2} = m_{r_1} \alpha_{P_3} + (1 - m_{P_3}) \alpha_{r_1}; \dots; \alpha_{r_i} = m_{r_{i-1}} \alpha_{P_{i+1}} + (1 - m_{P_{i+1}}) \alpha_{r_{i-1}};$$

$$\beta_{r_0} = \beta_{P_1}; \beta_{r_1} = (1 - m_{P_1}) \beta_{P_2} + (1 - m_{P_2}) \beta_{P_1}; \beta_{r_2} = m_{r_1} \beta_{P_3} + (1 - m_{P_3}) \beta_{r_1}; \dots; \beta_{r_i} = m_{r_{i-1}} \beta_{P_{i+1}} + (1 - m_{P_{i+1}}) \beta_{r_{i-1}}.$$

### 3. Оценивание нечеткого прогноза вероятности возникновения аварийной ситуации «Остановка главного двигателя танкера»

Используя приведенные выше зависимости выполнено приближенное интервальное оценивание нечеткого прогноза вероятности возникновения аварийной ситуации «Остановка главного двигателя танкера в ходу судна». Применив формализацию для качественного и количественного описания обстоятельств появления рассматриваемой

ситуации представим его причинную цепь в виде дерева отказов, показанного на рис. 2.

Наименование исходных событий-предпосылок данного дерева, а также параметры меры возможности их появления, аппроксимированные L-R-формой, приведены в таблице 1. При этом значения частоты отказов двигателей приняты на основании данных статического анализа.



Рис. 2. Дерево отказов для аварийного случая «Остановка главного двигателя» в ходу судна

Таблица 1

**Характеристики и параметры дерева отказов**

Символ	Постулируемые предпосылки	Параметры частоты, год <sup>-1</sup>	
		<i>m<sub>i</sub></i>	$\alpha_i = \beta_i$
A	Отказ главного двигателя	0,09	0,0050
B	Отказ дизель-генератора №1	0,12	0,0067
C	Отказ дизель-генератора №2	0,12	0,0067
D	Отказ дизель-генератора №3	0,12	0,0067

Как следует из дерева отказов, помимо исходных предпосылок и исследуемого аварийного события – X, имеется промежуточное событие – M. При этом очевидны следующие соотношения между исходными, промежуточным и головным событиями:

$$M = B \cdot C \cdot D; X = A + M. \quad (10)$$

Следовательно, целью количественного анализа дерева является определение следующих мер возможностей:

$P(*) = Poss(*)$ :  $P_M = P_B P_C P_D$ ;  $P_X = P_A + P_M$ , (11) которые могут быть найдены с помощью (7), (9). Примем, что функции принадлежности нечетких чисел аппроксимируются следующей L-R-формой:

$$P_i = \left\{ \begin{array}{l} L\left(\frac{m_i - x}{\alpha_i}\right) = \frac{1}{1 + \left|\frac{m_i - x}{\alpha_i}\right|}, x < m_i \\ R\left(\frac{x - m_i}{\beta_i}\right) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x - m_i}{\beta_i}\right|}, x > m_i \end{array} \right\}; \quad (12)$$

где  $m_i$  – значения частоты отказов  $i$ -го механизма, полученные по результатам статистической обработки данных танкеров;  $\alpha_i, \beta_i$  – симметричные относительно модального значения –  $m_i$  коэффициенты размаха  $i$ -ых нечетких чисел, равные между собой, а  $i \in \{A, B, C, D\}$  – постулируемые предпосылки.

Примем также, что степени принадлежности отдельных предпосылок изменяются от  $\mu_{P_i}(x_i = m_i) = 1$  – для точки пересечения ветвей

$x_i = m_i$  (по определению нечеткого числа) до

$\mu_{P_i}(x_i = m_i \pm 0,5m_i) \leq 0,1$  – при отклонениях переменной на половину величины  $m_i$ , то есть соблюдается следующее условие:

$$\mu_{P_i}(x_i = 0,5m_i) = \mu_{P_i}(x_i = 1,5m_i) = 0,1. \quad (13)$$

Иначе говоря, возможность того, что частота появления исследуемых событий отклоняется от заданных в таблице 1 средних значений на +50%, равна всего лишь 0,1. При принятых допущениях подстановка этого значения в формулу (12) дает:

$$\frac{1}{1 + \left|\frac{m_i - x}{\alpha}\right|} = \frac{\alpha}{\alpha + 0,5m} = 0,1, \quad (14)$$

из которого видно, что  $\alpha_i = \beta_i = 0,0556m_i$ . С учетом выражения (14) были получены величины размаха нечетких чисел, приведенные в таблице 1.

В соответствии с зависимостью (7) могут быть получены выражения для рекурсивных множителей  $m_{r_i}, \alpha_{r_i}$  модального значения частоты возникновения промежуточного исхода (событие M) –  $m_M$  и коэффициентов размаха данной нечеткой величины  $\alpha_M = \beta_M$ :

$$m_{r_1} = m_B m_C = 0,12 \cdot 0,12 = 0,0144;$$

$$m_M = m_{r_1} m_D = 0,0144 \cdot 0,12 = 0,0017;$$

$$\alpha_{r_1} = m_B \alpha_C + m_C \alpha_B = 0,12 \cdot 0,0067 + 0,12 \cdot 0,0067 = 0,0016;$$

$$\alpha_M = \beta_M = m_{r_1} \alpha_D + m_D \alpha_{r_1} = 0,0144 \cdot 0,0067 + 0,12 \cdot 0,0016 = 0,0003.$$

Интервальные оценки возможных значений частоты наблюдения такой ситуации представляются выражением:

$$P_M = (m_M, \alpha_M, \beta_M) = (0,0017; 0,0003; 0,0003). \quad (15)$$

Затем получены данные о возможности возникновения рассматриваемого аварийного случая – головного события дерева отказов, представленного на рис. 2. Для регистрации этого исхода необходимо и достаточно появление любого из событий: А или М. При данных условиях требуемый результат дает выражение (11), после подстановки в которое исходных данных получим следующие значения:

$$m_X = 1 - (1 - m_A)(1 - m_M) = 1 - (1 - 0,09)(1 - 0,0017) = 0,0915;$$

$$\alpha_X = \beta_X = (1 - m_A)\alpha_M + (1 - m_M)\alpha_A = (1 - 0,09) \cdot 0,0003 + (1 - 0,0017) \cdot 0,0050 = 0,0053.$$

Окончательное выражение для меры возможности реализации рассматриваемой аварийной ситуации будет иметь вид:

$$P_X(x) = (m_X, \alpha_X, \beta_X) = (0,0915; 0,0053; 0,0053).$$

Полученный результат указывает на возможность остановки главного двигателя в ходу судна, оцениваемую диапазоном изменения частоты от 0,0862 до 0,968 при наиболее вероятном ее значении 0,0915 год<sup>-1</sup>.

Далее производится рассмотрение всех возможных сценариев развития события – остановка главного двигателя в ходу танкера. Как показывает статистика катастрофических разливов нефти с танкеров, наиболее опасная ситуация может возникнуть в случае одновременного наличия следующих событий: следование танкера вблизи берега и наличие штормовой погоды. На основании экспертных оценок установлено, что вероятность движения танкера вблизи берега оценивается значением 0,04, а вероятность наличия штормовой погоды – 0,05. Тогда частота возникновения катастрофической ситуации с танкером будет равна:

$$\lambda_K = 0,0915 \cdot 0,04 \cdot 0,05 = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

### Заключение

Для проведения анализа безопасности эксплуатации судовых энергетических установок необходимо наличие достаточно представительных и однородных выборок по отказам основного механического оборудования. Несмотря на имеющуюся статистику отказов ее нельзя в полной мере считать массовой и однородной. Поэтому для анализа безопасности эксплуатации СЭУ танкеров использован не вероятностный, а возможностный подход, основанный на применении теории нечетких множеств. Данный метод требует представление исходных данных приближенными величинами, заданными на некоторых интервалах возможных значений. При этом осуществляется замена точечных оценок вероятностей конкретных предпосылок их интервальными оценками, выраженными в форме нечетких чисел.

Используя метод нечетких чисел получено, что возможность остановки главного двигателя в ходу судна будет оцениваться диапазоном изменения частоты от 0,0862 до 0,968 при наиболее вероятном ее значении 0,0915 год<sup>-1</sup>. Как показывает статистика катастрофических разливов нефти с танкеров, наиболее опасная ситуация может возникнуть в случае одновременного наличия следующих событий: следование танкера вблизи берега и наличие штормовой погоды. На основании экспертных оценок установлено, что вероятность движения танкера вблизи берега оценивается значением 0,04, а вероятность наличия штормовой погоды – 0,05. Тогда частота возникновения катастрофической ситуации с танкером вследствие разлива нефти будет равна 1,83 · 10<sup>-4</sup> год<sup>-1</sup>. Имея значение частоты аварий можно оценить величину риска и предложить мероприятия по его снижению, если риск будет превышать приемлемую величину.

### Литература

1. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
2. Khekert E.V., Epikhin A.I. Analysis of methods to optimize control systems for power supply of marine vessels using fuzzy logic and fractal analysis. Journal of Physics: Conference Series. 2061. 2021. 012088 doi:10.1088/1742-6596/2061/1/012088.
3. Kondratyev S.I., Epikhin A.I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels. Journal of Physics: Conference Series. 2061. 2021. 012089 doi:10.1088/1742-6596/2061/1/012089.
4. Young A.S., Kiwon S., Jaehyun C. Fuzzy-technique-based expert elicitation on the occurrence probability of severe accident phenomena in nuclear power plants. Nuclear Engineering and Technology. 2021. 53. S. 3298-3313.
5. Hsu H.M., Chen C.T. Aggregation of Fuzzy opinions under group decision making. Fuzzy Sets and Systems. 1996. 79 (3). S. 279-285.
6. Onisawa T. An application of Fuzzy concepts to modeling of reliability analysis. Fuzzy Sets and Systems. 1990. 37. S. 267-287.
7. Lin C.T., Wang M.J.J. Hybrid fault tree analysis using Fuzzy sets. Reliability Engineering and System Safety. 1997. 58. S. 205-213.
8. Ariavie G.O., Ovuworie G.C. Delphi fuzzy elicitation technique in the determination of third party failure probability of onshore transmission pipeline in the Niger delta region of Nigeria. Journal of Applied Sciences and Environmental Management. 2012. 16 (1). S. 95-101.
9. Chanda R.S., Bhattacharjee P.K. A reliability approach to transmission expansion planning using Fuzzy fault tree model. Electric Power Systems Research. 1998. 45. S. 101-108.
10. Yuhua D., Datao Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by Fuzzy fault tree analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2005. 18 (2). S. 83-88

11. Turkin V.A., Sarychev I.A., Ignatenko G.V. Monitoring pollution from ship power plants with laser technologies. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 867 (1). 2021. 012177. doi=10.1088/1755-1315/867/1/012177.
12. Туркин В.А., Давыдов Д.А., Стяжкин А.А. Оценка рисков эксплуатации судовых технических средств с учетом возможности возникновения киберинцидентов. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2 (52). Т.4. С. 58-66.

#### References

1. Dyubua D., Prad A. Teoriya vozmozhnostey. Prilozheniya k predstavleniyu znaniy v informatike [Theory of possibilities. Applications to knowledge representation in computer science]. M.: Radio i svyaz', 1990. 288 s.
2. Khekert E.V., Epikhin A.I. Analysis of methods to optimize control systems for power supply of marine vessels using fuzzy logic and fractal analysis. Journal of Physics: Conference Series. 2061. 2021. 012088 doi:10.1088/1742-6596/2061/1/012088.
3. Kondratyev S.I., Epikhin A.I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels. Journal of Physics: Conference Series. 2061. 2021. 012089 doi:10.1088/1742-6596/2061/1/012089.
4. Young A.S., Kiwon S., Jaehyun C. Fuzzy-technique-based expert elicitation on the occurrence probability of severe accident phenomena in nuclear power plants. Nuclear Engineering and Technology. 2021. 53. S. 3298-3313.
5. Hsu H.M., Chen C.T. Aggregation of Fuzzy opinions under group decision making. Fuzzy Sets and Systems. 1996. 79 (3). S. 279-285.
6. Onisawa T. An application of Fuzzy concepts to modeling of reliability analysis. Fuzzy Sets and Systems. 1990. 37. S. 267-287.
7. Lin C.T., Wang M.J.J. Hybrid fault tree analysis using Fuzzy sets. Reliability Engineering and System Safety. 1997. 58. S. 205-213.
8. Ariavie G.O., Ovuworie G.C. Delphi fuzzy elicitation technique in the determination of third party failure probability of onshore transmission pipeline in the Niger delta region of Nigeria. Journal of Applied Sciences and Environmental Management. 2012. 16 (1). S. 95-101.
9. Chanda R.S., Bhattacharjee P.K. A reliability approach to transmission expansion planning using Fuzzy fault tree model. Electric Power Systems Research. 1998. 45. S. 101-108.
10. Yuhua D., Datao Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by Fuzzy fault tree analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2005. 18 (2). S. 83-88
11. Turkin V.A., Sarychev I.A., Ignatenko G.V. Monitoring pollution from ship power plants with laser technologies [Assessing the risks of operating ship technical facilities, taking into account the possibility of cyber incidents]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 867 (1). 2021. 012177. doi=10.1088/1755-1315/867/1/012177.
12. Туркин В.А., Давыдов Д.А., Стяжкин А.А. Оценка рисков эксплуатации судовых технических средств с учетом возможности возникновения киберинцидентов. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2 (52). Т.4. С. 58-66.

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

**Владимир Антонович Туркин**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: turvla@mail.ru

**Александр Алексеевич Стяжкин**, аспирант кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: sasha-lol12@mail.ru

**Евгений Францевич Загурский**, аспирант кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: evgzag82@yandex.ru

**Vladimir A. Turkin**, Dr. Sci (Eng), Professor, Professor of the Department of Operation of ship mechanical installations, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: turvla@mail.ru

**Alexander A. Styazhkin**, Graduate student of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: sasha-lol12@mail.ru

**Evgeny F. Zagurskiy**, Graduate student of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: evgzag82@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 04.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.07.2022.

Научная статья

УДК 536.24.02

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.016>

## Вычисление числа Нуссельта для установившегося турбулентного неизотермического течения жидкости в трубе с постоянной плотностью теплового потока на стенке при использовании турбулентного числа Прандтля

Е.А. Никущенко<sup>1</sup> elena@nikushchenko.ru<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** При решении задач теплообмена при турбулентном течении жидкости в трубах в настоящее время приходится эмпирически вводить понятия турбулентной теплопроводности и соответствующего коэффициента турбулентной температуропроводности. Этот коэффициент выражают через коэффициент турбулентной вязкости, который конкретизируют с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности. В данной работе такая конкретизация получена на основе обобщения формулы Ньютона для касательного напряжения в жидкости за счет придания ей степенного вида. Рассчитано число Нуссельта для установившегося турбулентного неизотермического течения жидкости в трубе с постоянной плотностью теплового потока на стенке при использовании турбулентного числа Прандтля. Полученное решение задачи о течении жидкости в трубе в турбулентном режиме течения с постоянной плотностью теплового потока на стенке может быть полезно, по крайней мере, для получения предварительных, оценочных характеристик перед началом численного моделирования течения с использованием современных пакетов прикладных программ.

**Ключевые слова:** течение в трубе, плотность теплового потока, турбулентное число Прандтля, коэффициент турбулентной вязкости, число Нуссельта.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ № 075-03-2020-094/1 от 10.06.2020.

**Для цитирования:** Никущенко Е.А. Вычисление числа Нуссельта для установившегося турбулентного неизотермического течения жидкости в трубе с постоянной плотностью теплового потока на стенке при использовании турбулентного числа Прандтля, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 124—128.

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.016>

## Calculation of Nusselt number for a steady turbulent non-isothermal fluid flow in a pipe with constant heat flux density on the wall using turbulent Prandtl number

Elena A. Nikushchenko<sup>1</sup> elena@nikushchenko.ru<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** At present in process of solution of problems of heat transfer in a turbulent flow of fluid in pipes, it is necessary to empirically introduce the concepts of turbulent thermal conductivity and the corresponding coefficient of turbulent thermal diffusivity. This coefficient is usually written in terms of the turbulent viscosity coefficient, which is determined with help of one or another semi-empirical turbulence model. In the present article, such concretization is obtained based on a generalization of Newton's formula for shear stress in fluid by its representation a power-law form. Nusselt number is calculated for a stationary turbulent flow of a non-isothermal fluid in a pipe with a constant heat flux density on the wall using the turbulent Prandtl number. The obtained solution of the problem of fluid flow in a pipe in a turbulent flow regime with a constant heat flux density on the wall can be useful, at least to obtain of initial flow parameters before numerical simulation of the flow using modern software packages.

**Key words:** heat flux density, turbulent Prandtl number, turbulent viscosity, Nusselt number

**Financial Support:** The research funded by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation; contract number 075-03-2020-094/1 dated 10.06.2020

**For citation:** Elena A. Nikushchenko Calculation of Nusselt number for a steady turbulent non-isothermal fluid flow in a pipe with constant heat flux density on the wall using turbulent Prandtl number, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 124—128.

### Введение

Закон теплопроводности Фурье используется в уравнении энергии при описании процессов теплопередачи движущихся жидкостей. В случае ламинарного режима течения результаты расчетов и опытов дают удовлетворительное согласование, однако в турбулентных потоках такого согласования

уже нет. Приходится эмпирически вводить понятие турбулентной теплопроводности  $\lambda_t$  и соответствующего коэффициента турбулентной температуропроводности  $a_t$  [5,8,9]. Этот коэффициент выражается через коэффициент турбулентной вязкости  $V_t$ , который конкретизируется с помощью той или иной эмпирической модели

турбулентности. В данной работе такая конкретизация получена на основании обобщения формулы Ньютона для касательного напряжения в жидкости за счет придания ей степенного вида [6,7,11,12]. В результате плотность теплового потока  $q$  становится уже нелинейно связанной с градиентом температуры. Это позволяет получить решение задачи о течении жидкости в трубе в турбулентном режиме течения при постоянной плотности теплового потока на стенке. Для такого течения жидкости в прямой круговой трубе вдали от входа, т.е. при установившемся режиме течения, поля скоростей и температур не меняются вдоль оси трубы от сечения к сечению. Трение и теплопередача течения определяются двумя параметрами – безразмерными числами Прандтля  $Pr$  и Рейнольдса  $Re$ :

$$Re = \frac{2Ru_{cp}}{v}, Pr = \frac{v}{a}$$

где  $R$  - радиус трубы,  $u_{cp}$  - средняя скорость течения по сечению трубы,  $v$  - кинематическая вязкость,  $a$  - температуропроводность. После расчета поля температур можно найти число Нуссельта как функции этих параметров.

#### Определяющее уравнение для теплового потока как функция коэффициента турбулентной вязкости

Для записи коэффициента турбулентной вязкости течения можно использовать степенное обобщение формулы Ньютона [12] для вязкого трения  $\tau = \rho v \frac{du}{dy}$ , которое приводит для касательного напряжения к выражению:

$$\tau = \chi_n \rho (7v)^{1/4} \left( \left| \frac{du}{dr} \right| \right)^{3/4} \frac{du}{dr}, \quad (1)$$

где  $r$  - радиальная координата, отсчитываемая от оси трубы радиуса  $R$ ,  $u = u(r)$  - осевая скорость течения,  $\rho$  - плотность,  $v$  - кинематическая вязкость,  $\chi_n = 0.019746$  - феноменологическая константа. Заметим, что для течения в трубе формула (1) приводит к формуле Блазиуса для коэффициента сопротивления. Для дальнейших выкладок полезно ввести в рассмотрение безразмерные величины – скорость и координату:

$$V = \frac{u}{V_*}, \eta = \frac{r}{R}, 0 \leq \eta \leq 1,$$

где  $V_*$  - динамическая скорость, выражаемая через модуль касательного напряжения на стенке  $|\tau_w|$ . Использование выражения (1) для расчета течения в трубе приводит к следующему безразмерному профилю скорости и средней по сечению трубы скорости:

$$V = \beta [1 - \eta^5]^{1/7}, \beta = \left( \frac{Re_*}{5\chi_n^4} \right)^{1/7}, \quad (3)$$

$$V_{cp} = 0.934276\beta,$$

где  $Re_*$  - число Рейнольдса, вычисленное по динамической скорости:

$$Re_* = \frac{V_* R}{v}. \quad (4)$$

Связь между числами  $Re_*$  и числом Рейнольдса  $Re = \frac{2Ru_{cp}}{v}$ , вычисляемым по средней скорости, дает формула:

$$Re = 13.985077 Re_*^{8/7}. \quad (5)$$

Турбулентная кинематическая вязкость  $V_t$  согласно выражению (1), записывается в виде:

$$V_t = \chi_n (7v)^{1/4} \left( \frac{u^2}{|du/dr|} \right)^{3/4}, \quad (6)$$

или, используя безразмерные величины:

$$V_t = \chi_n (7v)^{1/4} (V_* R)^{3/4} \left( \frac{v^2}{|dV/d\eta|} \right)^{3/4} =$$

$$= \frac{\chi_n (7v)^{1/4} (V_* R)^{3/4} \left( \frac{7}{5} \right)^{3/4} \left( \frac{Re_*}{5\chi_n^4} \right)^{3/28} (1 - \eta^5)^{6/7}}{\eta^3} =$$

$$= \frac{7^{1/4} (7/5)^{3/4} \chi_n^{4/7}}{5^{3/28}} v Re_*^{6/7} (1 - \eta^5)^{6/7} =$$

$$= 0.187 v Re_*^{6/7} \frac{(1 - \eta^5)}{\eta^3}. \quad (7)$$

Турбулентное число Прандтля, по определению  $Pr_t = \frac{V_t}{a_t} = const$ , где  $a_t$  - турбулентная температуропроводность. Число  $Pr_t$  обычно принимается равным 0.92. Тогда коэффициент температуропроводности может быть записан через турбулентную вязкость в виде:  $a_t = V_t / 0.92$ .

Отсюда определяющим уравнением для плотности теплового потока при турбулентном режиме течения вместо закона теплопроводности Фурье будет:

$$q = \tau C_p \frac{V_t}{0.92 R} \frac{dT}{d\eta}, \quad (8)$$

где  $C_p$  - изобарная теплоемкость, величина  $V_t$  определена выражением (7).

#### Распределение величины плотности теплового потока по сечению трубы

Для установившегося неизотермического турбулентного течения несжимаемой жидкости в трубе с постоянной интенсивностью теплового потока на стенке  $q_w = const, Вт/м^2$  закон распределения теплового потока  $q, Вт/м^2$  по сечению трубы в цилиндрической системе координат имеет вид [1, 2, 5, 8]:

$$q = - \frac{2q_w}{R} \frac{1}{r} \int_r^R \frac{u}{u_{cp}} dr. \quad (9)$$

Этот закон распределения величины  $q$  при использовании обозначений (2) можно записать в виде:

$$q = - \frac{2q_w}{\eta} \int_0^\eta \eta \frac{V}{V_{cp}} d\eta. \quad (10)$$

После подстановки величин  $V$  и  $V_{cp}$  согласно (3) имеем:

$$q = - \frac{q_w}{0.934276} \left( 2 \int_0^\eta (1 - \eta^5)^{1/7} \eta d\eta \right). \quad (11)$$

Интеграл в этом выражении приводит к гипергеометрической функции, которую на интервале [0;1] можно аппроксимировать с точностью до 1% и представить его в следующем виде:

$$2 \int_0^1 [1 - \eta^5]^{1/7} \eta d\eta \cong \eta^2 - 0.0657234 \eta^{10} + C_1.$$

В результате для плотности теплового потока согласно (11) имеем, учитывая, что  $q|_{\eta=0} = 0$ , откуда  $C_1 = 0$ :

$$q = - \frac{q_w}{0.934276} (\eta - 0.0657234 \eta^9).$$

Тогда условие, согласно которому  $q|_{\eta=1} = -q_w$  также выполняется/ Выражение в скобках с точностью не менее 5% можно аппроксимировать в виде линейной функции? в результате чего выражение для распределения плотности теплового потока по сечению трубы принимает вид:

$$q = -q_w \eta. \quad (12)$$

#### Уравнение распределения температуры и число Нуссельта

Сравнение правых частей выражений (8) и (12) дает уравнение распределения температуры по сечению трубы:

$$\frac{\rho C_p}{R} \cdot \frac{0.187}{0.92} v Re^{6/7} \frac{(1 - \eta^5)}{\eta^3} \frac{dT}{d\eta} = q_w \eta \quad (13)$$

или, учитывая связь между числами Рейнольдса согласно (5):

$$0.0281 \frac{\rho C_p a}{R} \cdot \frac{v}{a} Re^{3/4} \frac{(1 - \eta^5)^{6/7}}{\eta^3} \frac{dT}{d\eta} = q_w \eta. \quad (14)$$

Отсюда, используя понятие молекулярного числа Прандтля  $Pr = \frac{\rho C_p a}{\lambda}$  и учитывая, что  $\lambda = \rho C_p a$ :

$$\frac{dT}{d\eta} = \frac{1}{0.0281} \left( \frac{q_w R}{\lambda} \right) \frac{1}{Pr \cdot Re^{3/4}} \left( \frac{\eta^4}{(1 - \eta^5)^{6/7}} \right). \quad (15)$$

Интегрируя, имеем:

$$T = - \frac{0}{0.0281} \left( \frac{q_w R}{R} \right) \frac{1}{Pr \cdot Re^{3/4}} \cdot \frac{7}{5} (1 - \eta^5)^{1/7} + C_2. \quad (16)$$

Постоянная интегрирования  $C_2$  и з условия  $T = T_w$  при  $\eta = 1$  принимает значение  $C_2 = T_w$ . Тогда полученное выражение для температуры можно представить в виде:

$$T = T_w - \frac{(1 - \eta^5)^{1/7}}{(0.0144 Pr \cdot Re^{1/4})} \cdot \left( \frac{q_w R}{\lambda} \right). \quad (17)$$

Среднемассовая температура согласно определению [3,10]:

$$\begin{aligned} T_f &= \frac{2}{R^2} \int_0^R T \frac{u}{u_{cp}} r dr = 2 \int_0^1 T \frac{V}{V_{cp}} \eta d\eta = \\ &= 2 \int_0^1 T_w \frac{V}{V_{cp}} \eta d\eta - \\ &- \frac{(2q_w R/\lambda)}{(0.0144 Pr \cdot Re^{1/4})} \int_0^1 (1 - \eta^5)^{1/7} \frac{V}{V_{cp}} \eta d\eta = \\ &= \frac{2T_w}{0.934276} \int_0^1 (1 - \eta^5)^{1/7} \eta d\eta - \\ &- \frac{(2q_w r/\lambda)}{(0.0144 Pr \cdot Re^{3/4}) \cdot 0.934276} \int_0^1 (1 - \eta^5)^{2/7} \eta d\eta = \\ &= T_w \frac{2 \cdot 0.457138}{0.934276} - \\ &- \left( \frac{2q_w R}{\lambda} \right) \left( \frac{0.440566}{0.934276 \cdot 0.0144} \right) \frac{1}{Pr \cdot Re^{3/4}} = \\ &= T_w - \left( \frac{2q_w R}{\lambda} \right) / (0.0305 Pr \cdot Re^{3/4}). \end{aligned} \quad (18)$$

Поскольку число Нуссельта для течения в трубе

$$[1] Nu = \frac{2q_w R}{\lambda(T_w - T_f)}, \text{ то отсюда имеем:} \\ Nu = 0.0305 Pr \cdot Re^{3/4}. \quad (19)$$

Интересно сравнить полученное выражение для числа Нуссельта с результатом расчета этого течения при использовании в качестве определяющего уравнения закон теплопроводности Фурье/ В случае использования этого закона число Нуссельта можно рассчитать по интегралу Лайона, который для профилей ламинарного режима течения дает значение  $Nu = 4.36$ . Для турбулентного режима профили скорости, вычисленные с помощью степенного обобщения формулы Ньютона [12] согласно выражений (3), можно подставить в интеграл Лайона [5,8]. Тогда его значение будет следующим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Nu} &= 2 \int_0^1 \left( \int_0^\eta \frac{V}{V_{cp}} \eta d\eta \right)^2 \frac{d\eta}{\eta} = \\ &= \frac{2}{0.934276} \int_0^1 \left( \int_0^\eta (1 - \eta^5)^{1/7} \eta d\eta \right)^2 / \eta d\eta = \\ &= \frac{2 \cdot 0.0596713}{0.934276} = 0.136724. \end{aligned}$$

Отсюда число Нуссельта для любых чисел Рейнольдса турбулентного потока  $Nu = 7.31$ , что несколько выше, нежели для ламинарного режима течения. Наличие зависимости  $Nu$  от числа Рейнольдса, а также Прандтля, которая наблюдается в опытах [2,8], свидетельствует о необходимости модификации закона теплопроводности Фурье, что приводит к введению в рассмотрение понятия турбулентной теплопроводности.

В этом случае коэффициент турбулентной теплопроводности выражают через коэффициент турбулентной вязкости, который конкретизируют с помощью той или иной эмпирической модели турбулентности. В данной работе такая конкретизация получена на основе обобщения формулы Ньютона для касательного напряжения в жидкости за счет придания ей степенного вида. В результате полученное выражение для числа Нуссельта содержит зависимость от чисел Рейнольдса и Прандтля, что согласуется с экспериментом [8].

Ввиду отсутствия в современной литературе экспериментальных данных по теплообмену для турбулентного течения теплоносителя в трубе с постоянной интенсивностью теплового потока, пока нет возможности произвести сравнение полученного результата с опытом. Однако следует заметить, что порядок величин чисел Нуссельта (19) согласуется с их порядком в опытах, результаты которых можно приближенно описывать [7,8] зависимостью чисел Стентона  $St$  от коэффициента сопротивления  $\xi$  в виде  $St = \xi/8$ . Учитывая, что  $St = Nu/(Re \cdot Pr)$ , отсюда следует  $Nu = (\xi/8)Re \cdot Pr$ . Поскольку для турбулентного режима течения в трубе можно использовать формулу Блазиуса  $\xi = 0.3164/Re^{0.25}$ , то тогда при  $Pr = 1$  число

Нуссельта  $Nu = 0.03955Re^{0.75}$ . При  $Re = 10^4$  число Нуссельта  $Nu = 39.55$ , при  $Re = 10^5$  оно равно  $Nu = 222.41$ . Видно, что порядок этих цифр согласуется с результатами формулы (19). Примерно те же результаты дает экспериментальная формула Кутателадзе [4]:

$$Nu = 0.115(\xi/8)^{0.5} Re \cdot Pr^{0.25}.$$

#### Заключение

Конкретизация коэффициента турбулентной вязкости на основе обобщения формулы Ньютона для касательного напряжения в жидкости за счет придания ей степенного вида позволяет с помощью понятия турбулентного числа Прандтля находить коэффициент турбулентной теплопроводности. Это позволяет рассчитывать установившиеся турбулентные неизотермические течения жидкости и вычислять соответствующие числа Нуссельта.

Решение задачи об установившемся турбулентном неизотермическом течении жидкости в трубе с постоянной плотностью теплового потока на стенке при использовании такой конкретизации коэффициента турбулентной вязкости приводит к значению числа Нуссельта, согласующееся с известными экспериментальными данными.

#### Литература

1. Бубенчиков А.М., Комаровский Л.В., Харламов С.Н. Математические модели течения и теплообмена во внутренних задачах динамики вязкого газа. Томск: Изд-во. Том. Ун-та, 1993. – 178 с.
2. Исаченко В.П. Теплопередача: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Конвективный теплоперенос и теплообмен: учеб. пособие. – Томск: СТТ, 2017. – 80 с.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена, М: Атомиздат. 1979 – 234с.
5. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.: Госэнергоиздат, 1956–321 с.
6. Павловский В.А., Кабриц С.А. Расчёт турбулентного пограничного слоя плоской пластины // Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Том. 17, вып. 4. С. 370–380.
7. Павловский В.А. Степенное обобщение формулы теплопроводности Фурье и вытекающие из него варианты для записи уравнения энергии. Морские интеллектуальные технологии. No 2, часть 2, 2022. С. 133-138.
8. Петухов Б.С. Вопросы теплообмена (избранные труды). М.: Наука. 1987. – 278 с.
9. Сахин В.В. Конвективный теплообмен в однородной среде (теплоотдача): учебное пособие. Балтийский государственный технический университет. – СПб, 2013. – 224 с.
10. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.
11. Никущенко Д.В., Павловский В.А., Никущенко Е.А. Развитие потока жидкости в трубе как демонстрация последовательного изменения ее реологических свойств. Прикладные науки 2022, 12. doi:10.3390/app12063058
12. Павловский В. А. Степенное обобщение формулы Ньютона для напряжения сдвига в жидкости в виде тензорного реологического соотношения. Вестник Санкт-Петербургского государственного университета, Математика, Том 55, № 2. 2022, С. 229–234.

#### References

1. Bubenchikov A.M., Komarovskiy L.V., Kharlamov S.N. Mathematical models of flow and heat transfer in internal problems of viscous gas dynamics. Tomsk: Publishing House. Tom. Un-ta, 1993. – 178 p.
2. Isachenko V.P. Heat transfer: Textbook for universities. – 4th ed., reprint. and additional / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. M.: Energoizdat, 1981. – 416 p.
3. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. Convective heat transfer and heat exchange: textbook. stipend. – Tomsk: STT, 2017. – 80 p.
4. Kutateladze S.S. Fundamentals of the theory of heat transfer, M: Atomizdat. 1979 – 234с.
5. Mikheev M.A. Fundamentals of heat transfer. M.: Gosenergoizdat, 1956-321 p.
6. Pavlovskiy V.A., Kabrits S.A. Calculation of the turbulent boundary layer of a flat plate // Bulletin of St. Petersburg State University. Applied mathematics. Computer science. Management processes. 2021. Vol. 17, vol. 4. pp. 370-380.

7. Pavlovsky V.A. Power generalization of the Fourier thermal conductivity formula and the resulting variants for writing the energy equation. Marine intelligent technologies. No. 2, part 2, 2022. С. 133-138.
8. Petukhov B.S. Questions of heat exchange (selected works). М.: Nauka. 1987. – 278 p.
9. Sakhin V.V. Convective heat transfer in a homogeneous medium (heat transfer): study guide. Baltic State Technical University. – St. Petersburg, 2013. – 224 p.
10. Shchukin V.K. Heat transfer and hydrodynamics of internal flows in the fields of mass forces. Moscow: Mashinostroenie, 1980. – 240 p.
11. Nikushchenko D.V., Pavlovsky V.A., Nikushchenko E.A. The development of fluid flow in a pipe as a demonstration of a consistent change in its rheological properties. Applied Sciences 2022, 12. doi:10.3390/app12063058
12. Pavlovsky V. A. A power generalization of Newton's formula for shear stress in a fluid in the form of a tensor rheological relation. Bulletin of St. Petersburg State University, Mathematics, Volume 55, No. 2. 2022, pp. 229-234.

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

**Елена Александровна Никущенко**, инженер научно-исследовательской части, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: elena@nikushchenko.ru

**Elena A. Nikushchenko**, born in 1984, Researcher in Research Department of State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: elena@nikushchenko.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.06.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 28.07.2022.

Научная статья

УДК 621.438

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.017>

## Оптимальные значения угла выхода потока из соплового аппарата радиально-осевой турбины в зависимости от режима ее работы

А.В. Пассар<sup>1</sup> [passar\\_av@mail.ru](mailto:passar_av@mail.ru), Д.В. Тимошенко<sup>2</sup> [000595@pnu.edu.ru](mailto:000595@pnu.edu.ru),

Ю.Я. Фершалов<sup>3</sup> [FershalovJuriy@mail.ru](mailto:FershalovJuriy@mail.ru)

<sup>1</sup>Вычислительный центр ДВО РАН, <sup>2</sup>Тихоокеанский государственный университет,

<sup>3</sup>Дальневосточный федеральный университет

**Аннотация.** Статья преследует цель обосновать выбор оптимальных значений угла выхода потока из соплового аппарата радиально-осевой турбины в зависимости от режима работы, определяемого располагаемым теплоперепадом. Авторы предлагают математическую модель для среднего радиуса проточной части в одномерном квазистационарном приближении. Модель основана на использовании уравнений энергии, расхода и момента количества движения, записанных для среднего радиуса меридионального сечения турбины. Уравнения дополнены комплексом эмпирических зависимостей, позволяющих определять значения потерь кинетической энергии в элементах проточной части. В результате получены геометрические параметры проточных частей радиально-осевых турбин для различных углов выхода потока газа из соплового аппарата. Определена степень влияния угла выхода потока из соплового аппарата на внутренний КПД, пропускную способность, эффективную мощность и потери энергии потока. На основе полученных результатов даны рекомендации по проектированию проточной части радиально-осевых турбин.

**Ключевые слова:** угол выхода потока, радиально-осевая турбина, КПД, газотурбинная установка, степень реактивности, высота лопатки, степень радиальности.

**Для цитирования:** Пассар А.В., Тимошенко Д.В., Фершалов Ю.Я. Оптимальные значения угла выхода потока из соплового аппарата радиально-осевой турбины в зависимости от режима ее работы, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 129—135.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.017>

## Optimal values of the angle of exit of the flow from the nozzle apparatus radial-axial turbine, depending on the mode of its operation

Andrey V. Passar<sup>1</sup> [passar\\_av@mail.ru](mailto:passar_av@mail.ru), Denis V. Timoshenko<sup>2</sup> [000595@pnu.edu.ru](mailto:000595@pnu.edu.ru),

Yuriy Ya. Fershalov<sup>3</sup> [FershalovJuriy@mail.ru](mailto:FershalovJuriy@mail.ru)

<sup>1</sup>Computer Center of Far East Branch of the of the Russian Academy of Science, Khabarovsk, Russian Federation,

<sup>2</sup>Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation, <sup>3</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** The article aims to justify the choice of optimal values of the flow exit angle from the nozzle apparatus of a radial-axial turbine, depending on the operating mode determined by the available heat transfer. The authors propose a mathematical model for the average radius of the flow part in a one-dimensional quasi-stationary approximation. The model is based on the use of the equations of energy, flow and momentum of the amount of motion recorded for the average radius of the meridional section of the turbine. The equations are supplemented with a set of empirical dependencies that allow determining the values of kinetic energy losses in the elements of the flow part. As a result, the geometric parameters of the flow parts of radial-axial turbines for different angles of the gas flow out of the nozzle apparatus are obtained. The degree of influence of the flow exit angle from the nozzle apparatus on the internal efficiency, throughput, effective power and energy loss of the flow is determined. Based on the results obtained, recommendations are given for the design of the flow part of radial-axial turbines.

**Keywords:** flow exit angle, radial-axial turbine, efficiency, gas turbine unit, degree of reactivity, blade height, degree of radiality

**For citation:** Andrey V. Passar, Denis V. Timoshenko, Yuriy Ya. Fershalov Optimal values of the angle of exit of the flow from the nozzle apparatus radial-axial turbine, depending on the mode of its operation. 2022. № 3 part 1. P. 129—135.

### Введение

Турбопривод широко применяется во всем мире в качестве двигателей для механизмов различного назначения. Несмотря на относительно высокий уровень КПД маломощных одновенечных осевых малоразмерных газовых турбин, разрабатываемых в настоящее время [1, 2], они значительно уступают радиально-осевым турбинам (РОТ) по

энергетическим показателям, в то же время центробежные турбины имеют уровень КПД ниже, чем осевые. Именно поэтому применение РОТ в энергетических установках предпочтительно. Особенно это относится к газотурбинным и микротурбинным установкам, используемым в судостроении в качестве эффективных источников электрической, механической и тепловой энергии, во вспомогательных силовых установках наземных

транспортных средств и авиации, турбодетандерных установках, а также в агрегатах наддува поршневых ДВС (турбокомпрессорах).

В проточной части РОТ можно выделить набор основных конструктивных параметров, оказывающих решающее влияние на эффективные показатели и пропускную способность турбины. Согласно классической теории турбомашин к их числу относится угол установки лопаток соплового аппарата (СА), определяющий значение угла выхода потока ( $\alpha_1$ ) из них (рис. 1), [3, 4].

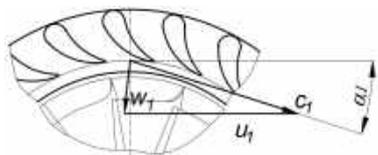


Рис. 1. Треугольник скоростей на выходе из СА

В работах [3, 4], посвященных определению влияния угла выхода потока из СА на окружной и внутренний КПД РОТ, установлено, что уменьшение угла выхода потока в ряде случаев может привести к повышению КПД турбины. Так, значение внутреннего КПД РОТ турбокомпрессора ТКР-14, оборудованной СА, при уменьшении  $\alpha_1$  с 27 до 15° и при постоянной высоте сопловых лопаток выросло на 8% [5]. Результаты исследования малоразмерной РОТ ТК-4 при изменении  $\alpha_1$  от 9 до 18° с шагом 3° и постоянной высоте лопаток 10,5 мм подтвердили приведенный выше результат. В последнем примере наибольшие значения эффективного КПД были при  $\alpha_1 = 9^\circ$ . При уменьшении  $\alpha_1$  от 18 до 12° наблюдался рост КПД, но в диапазоне от 12 до 9° его увеличение было незначительным [6].

Представляют интерес комплексные исследования конструктивного исполнения проточной части РОТ, результаты которых представлены в [7]. Установлено совместное влияние на эффективность РОТ  $\alpha_1$ , степени радиальности РК и отношения высоты сопловых лопаток к диаметру РК. Оказалось, что воздействие на КПД  $\alpha_1$  является преимущественным. В частности, уменьшение  $\alpha_1$  с 34 до 16° привело к росту уровня КПД турбины на 31 % (с 0,56 до 0,87). В то же время для всего диапазона значений степени радиальности рост уровня составил менее 14%.

Подходы к проектированию РОТ, основанные на использовании методов CFD (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидродинамика), не предполагают углубленного анализа влияния на КПД конструктивных особенностей проточной части турбины. Выполненные работы ориентируются на методы многопараметрической оптимизации под конкретные значения режимных параметров турбины [8–11].

Несмотря на то что результаты, представленные в [1–11], показали рост КПД турбин при уменьшении угла выхода потока из СА до определенных значений, многие аспекты, связанные с таким решением, нуждаются в дополнительных исследованиях. В частности, не решен вопрос нахождения оптимального значения  $\alpha_1$  с учетом параметров режима работы турбины, определяемого располагаемым теплоперепадом и величиной окружной скорости РК. Нет ясности в выборе величины  $\alpha_1$  совместно с другими геометрическими параметрами проточной части обеспечивающего высокое значение КПД и требуемую пропускную способность турбины.

Недостаточно информации о влиянии  $\alpha_1$  на потери кинетической энергии (далее – потери) в элементах проточной части турбины. Ситуация осложняется трудностями при решении задач оптимального проектирования проточных частей РОТ вне зависимости от области их применения. Перечисленные выше вопросы формируют цель настоящего исследования – обосновать выбор оптимальных значений  $\alpha_1$  в зависимости от режима работы турбины, определяемого располагаемым теплоперепадом. Затем на основе полученных результатов разработать рекомендации для проектирования проточной части РОТ оптимальной формы за счет обоснованного выбора величины  $\alpha_1$  с учетом степени и характера влияния на характеристики РОТ в зависимости от режима работы. Для достижения поставленной цели необходимо было решить задачи, которые, по предположению авторов, позволяют:

- 1) разрабатывать конструктивное исполнение проточных частей РОТ для разных режимов работы, основываясь на методе оптимального проектирования;
- 2) выполнять расчет эксплуатационных характеристик РОТ, используя одномерную модель расчета турбины на среднем радиусе ее проточной части;
- 3) получать обоснованные рекомендации по оптимальному проектированию турбин рассматриваемого типа на основании результатов анализа значений параметров эффективности турбины, зависящих от угла натекания потока на лопатки РК.

#### Предлагаемая математическая модель оптимального проектирования проточной части РОТ

В рамках предлагаемой математической модели проектирование проточной части РОТ выполняется, основываясь на иерархической структуре трех этапов различного уровня сложности:

- 1-й этап – проектный расчет проточной части с использованием метода оптимального проектирования для заданных значений расхода газа и располагаемого теплоперепада, определяемого давлением и температурой газа на входе в турбину;
- 2-й – первичная оценка проектного решения на основании результатов расчета с использованием метода расчета турбины на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении;
- 3-й этап – корректировка конструктивных параметров проточной части на основании окончательной оценки проектного решения, полученного путем анализа результатов расчета течения в турбине с использованием одной из моделей пространственного течения [8, 9, 12–15].

В настоящей работе авторами рассмотрены первый и второй этапы.

Для выбора геометрических характеристик проточной части турбины необходим подбор оптимальных параметров: относительной окружной скорости (1) и степени реактивности ( $\rho_{opt}$ ) (2), который осуществляется по методу, предложенному в [3, 16]:

$$\tilde{u}_{1opt} = \frac{\psi}{\sqrt{\mu^2 \left( \frac{\cos^2 \beta_2}{m^2} - \psi^2 \right) + \frac{(1-m^2\psi^4)\psi^2 \cos^2 \alpha_1}{m^2 \psi^2 (1-\varphi^2)}}}, \quad (1)$$

$$\rho_{opt} = 1 - \left[ (1 - m\psi^2) \varphi \cos \alpha_1 \tilde{u}_1 / (m\psi^2 (1 - \varphi^2)) \right]^2. \quad (2)$$

Здесь  $m = \frac{1}{\psi^2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{\mu^2 (1-\varphi^2) (1-\cos^2 \beta_2 \psi^2)}{\cos^2 \alpha_1 \varphi^2 + \mu^2 (1-\varphi^2)}} \right]$ ;  $\tilde{u}_{1opt} = u_1 / c_{ад}$ ;

$u_1$  – окружная скорость РК на среднем радиусе входного сечения;  $c_{ад}$  – условная скорость,

соответствующая располагаемому теплоперепаду на турбине.

Для найденных значений  $\bar{u}_{1opt}$  и  $\rho_{opt}$ , заданных значений расхода газа, давления и температуры на входе в турбину становится возможным проектный расчет проточной части по методикам [3, 7, 16]. В результате этого расчета определяются следующие геометрические параметры турбины:  $R_{2i}$  – радиус втулки РК;  $R_{20}$  – внешний радиус РК в выходном сечении;  $R_{cp}$  – средний радиус РК в выходном сечении;  $l_1$  – высота лопатки РК на входе в проточную часть;  $l_2$  – высота лопатки РК на выходе из проточной части;  $R_1$  – внутренний радиус РК на входе в проточную часть. Угол выхода из РК принят для всех ступеней  $\beta_2 = 36^\circ$ .

Проточные части проектировались для следующих режимных параметров турбины: полное давление на входе – 0,2 МПа, расход газа – 0,45 кг/с,  $\rho_{opt}$  и  $\bar{u}_{1opt}$ . Для принятых углов выхода сопел получены: для  $\alpha_1 = 12^\circ$  –  $\rho_{opt} = 0,358$  и  $\bar{u}_{1opt} = 0,652$ ; для  $\alpha_1 = 15^\circ$  –  $\rho_{opt} = 0,357$  и  $\bar{u}_{1opt} = 0,658$ ; для  $\alpha_1 = 18^\circ$  –  $\rho_{opt} = 0,362$  и  $\bar{u}_{1opt} = 0,67$ ; для  $\alpha_1 = 21^\circ$  –  $\rho_{opt} = 0,36$  и  $\bar{u}_{1opt} = 0,68$ ; для  $\alpha_1 = 25^\circ$  –  $\rho_{opt} = 0,352$  и  $\bar{u}_{1opt} = 0,695$ . Установленные значения геометрических параметров являются исходными для построения проточной части РК (рис. 2). Далее турбины с такими РК будем называть опытными турбинами.

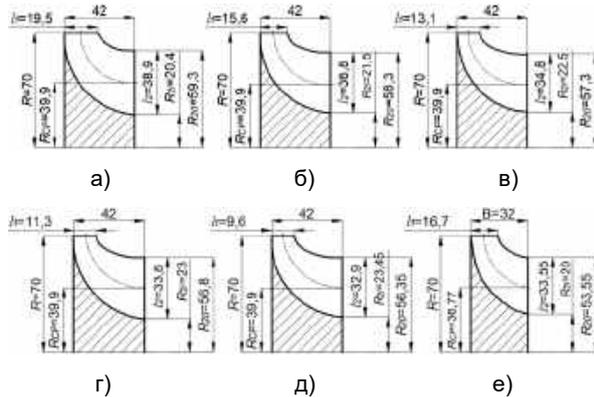


Рис. 2. Рабочие колеса турбин:  
а)  $\alpha_1 = 12^\circ$ ; б)  $\alpha_1 = 15^\circ$ ; в)  $\alpha_1 = 18^\circ$ ; д)  $\alpha_1 = 21^\circ$ ; е)  $\alpha_1 = 25^\circ$ ;  
е) турбина ТКР-14С-27

Число лопаток для всех РК принято  $Z_{pk} = 13$ . Оптимальная частота вращения РК: для  $\alpha_1 = 12^\circ$ ,  $n_{opt} = 45100 \text{ мин}^{-1}$ ; для  $\alpha_1 = 15^\circ$ ,  $n_{opt} = 45500 \text{ мин}^{-1}$ , для  $\alpha_1 = 18^\circ$ ,  $n_{opt} = 46300 \text{ мин}^{-1}$ , для  $\alpha_1 = 21^\circ$ ,  $n_{opt} = 47050 \text{ мин}^{-1}$  и для  $\alpha_1 = 25^\circ$ ,  $n_{opt} = 48090 \text{ мин}^{-1}$ . Как показали результаты расчета, увеличение  $\alpha_1$  приводит к уменьшению высот лопаток на входе и выходе из РК, а также к увеличению оптимальной частоты вращения РК. Высоты лопаток на входе и выходе из РК определялись по нижеприведенным уравнениям (3) и (4) связанными с расходом газа через турбину

$$l_1 = G_T RT_1 / (\pi D_1 c_1 p_1 \sin \alpha_1), \quad (3)$$

$$l_2 = G_T RT_2 / (\pi D_{cp} w_2 p_2 \sin \beta_2). \quad (4)$$

где:  $G_T$  – расход газа;  $R$  – индивидуальная газовая постоянная;  $T_1$  – статическая температура газа перед РК;  $T_2$  – статическая температура газа при выходе из РК;  $D_1$  – диаметр оснований лопаток РК во входном сечении;  $D_{cp}$  – средний диаметр РК в выходном сечении;  $c_1$  – абсолютная скорость газа на выходе из СА;  $w_2$  – относительная скорость потока на выходе из РК;  $\alpha_1$  – угол выхода потока из СА;  $\beta_2$  – угол выхода

потока из РК;  $p_1$  – статическое давление газа перед РК;  $p_2$  – статическое давление газа за РК.

Для сформированных проточных частей опытных турбин выполнен расчет характеристик с использованием математической модели параметров турбины на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении [17–21]. Модель дополнена комплексом эмпирических зависимостей для получения возможности определять потери в элементах проточной части [22].

Корректность математической модели подтверждена проверкой на адекватность результатов, полученных расчетным путем, с экспериментальными результатами, выявленными в ходе исследований турбокомпрессора ТКР-14С-27: погрешность составила 2–3%. Это подтверждает правомочность использования эмпирических зависимостей при расчетах потерь в проточной части турбины [22]. Результаты проведенного эксперимента можно распространить и на другие турбины, относящиеся к тому же типоразмеру, что и турбина турбокомпрессора ТКР-14С-27.

### Результаты исследования

Для наглядности все характеристики турбин представлены в зависимости от коэффициента напора ( $\bar{H}_T = 2H_T / u_1^2$ , где:  $H_T$  – мгновенное значение располагаемого (изоэнтропийного) теплоперепада от полных параметров перед турбиной до статического давления за турбиной;  $u_1$  – окружная скорость оснований лопаток РК на входе).

Для расчетных характеристик КПД опытных РОТ характерно наличие двух участков (рис. 3). Первый участок имеет диапазон значений  $\bar{H}_T$  от 1,1 до 1,9, второй – от 1,9 до 3,3. На 1-м участке КПД турбины существенно зависит от величины  $\alpha_1$  и возрастает с увеличением последнего. На 2-м участке влияние угла выхода потока на КПД менее значительно и его характер изменяется: с увеличением угла выхода потока КПД турбины незначительно снижается.

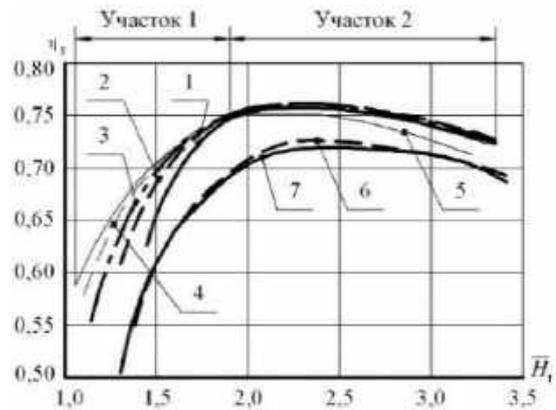


Рис. 3. Зависимости КПД турбин:

1 –  $\alpha_1 = 12^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = 15^\circ$ ; 3 –  $\alpha_1 = 18^\circ$ ; 4 –  $\alpha_1 = 21^\circ$ ;  
5 –  $\alpha_1 = 25^\circ$ ;

6 – экспериментальная характеристика РОТ ТКР-14С-27;

7 – расчетная характеристика РОТ ТКР-14С-27

Анализ приведенных характеристик выявил, что максимальный уровень КПД достигается: для  $\alpha_1 = 12^\circ$  –  $\eta_{Tmax} = 0,761$  при  $\bar{H}_T = 2,27$ ; для  $\alpha_1 = 15^\circ$  –  $\eta_{Tmax} = 0,765$  при  $\bar{H}_T = 2,31$ ; для  $\alpha_1 = 18^\circ$  –  $\eta_{Tmax} = 0,765$  при

$\bar{H}_T = 2,23$ ; для  $\alpha_1 = 21^\circ - \eta_{T\text{макс}} = 0,761$  при  $\bar{H}_T = 2,24$ ; для  $\alpha_1 = 25^\circ - \eta_{T\text{макс}} = 0,754$  при  $\bar{H}_T = 2,22$ .

Характер изменения расхода газа через турбину в функции коэффициента напора (рис. 4) показывает, что пропускная способность турбины возрастает с увеличением как  $\bar{H}_T$ , так и  $\alpha_1$ . Величина изменения эффективной мощности турбины (рис. 5) согласуется с пропускной способностью.

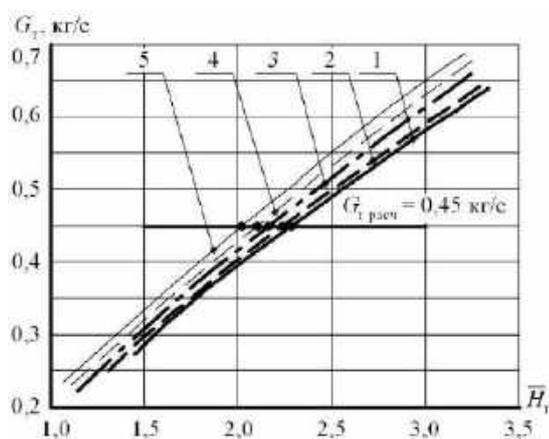


Рис. 4. Зависимости расхода газа:  
1 –  $\alpha_1 = 12^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = 15^\circ$ ; 3 –  $\alpha_1 = 18^\circ$ ;  
4 –  $\alpha_1 = 21^\circ$ ; 5 –  $\alpha_1 = 25^\circ$

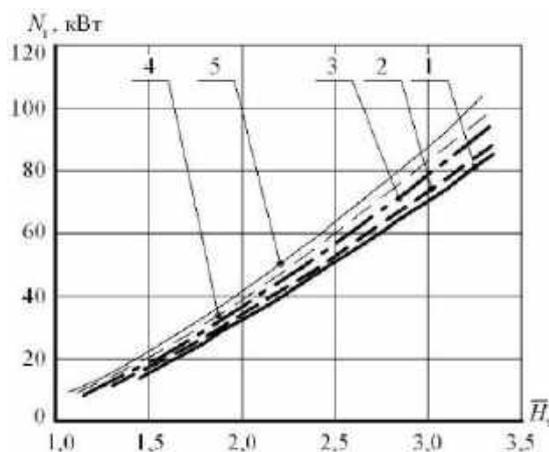


Рис. 5. Зависимости эффективной мощности:  
1 –  $\alpha_1 = 12^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = 15^\circ$ ; 3 –  $\alpha_1 = 18^\circ$ ;  
4 –  $\alpha_1 = 21^\circ$ ; 5 –  $\alpha_1 = 25^\circ$

Интерес представляют результаты изменения значения степени реактивности  $\rho$  опытных турбин, что объясняется важностью корректного выбора их величины при проектных расчетах проточной части РОТ. Характеры изменения  $\rho$  (рис. 6) и КПД совпадают удовлетворительно. Присутствуют два участка с диапазонами значений  $\bar{H}_T = 1,1-1,9$  и  $\bar{H}_T = 1,9-3,3$ . На первом участке величина  $\rho$  зависит от  $\alpha_1$  и возрастает с увеличением последнего, на втором участке такой зависимости нет. На втором участке несколько выпадают значения при  $\alpha_1 = 25^\circ$ , но это в целом не меняет общей картины. Необходимо отметить общее снижение величины  $\rho$  при увеличении  $\bar{H}_T$ .

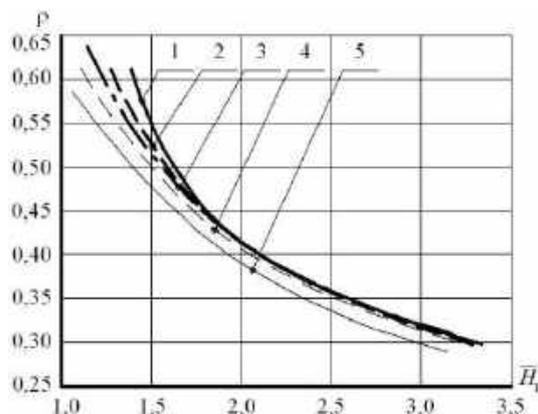


Рис. 6. Зависимости  $\rho$ :  
1 –  $\alpha_1 = 12^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = 15^\circ$ ; 3 –  $\alpha_1 = 18^\circ$ ;  
4 –  $\alpha_1 = 21^\circ$ ; 5 –  $\alpha_1 = 25^\circ$

Детализация потерь в проточной части по ее элементам позволяет расшифровать механизм влияния  $\alpha_1$  на характеристики турбины. Определение потерь производилось по уравнениям (4), (5) и (6):

• потери в СА

$$Z_{ca} = \left(\frac{1}{\phi^2} - 1\right) \frac{c_1^2}{2}, \quad (4)$$

где  $\phi$  – коэффициент скорости СА,  $c_1$  – абсолютная скорость на выходе из СА;

• потери в рабочем колесе

$$Z_{pk} = \left(\frac{1}{\psi^2} - 1\right) \frac{w_2^2}{2}, \quad (5)$$

где  $\psi$  – коэффициент скорости РК;  $w_2$  – относительная скорость на выходе из РК;

• потери с выходной скоростью

$$Z_{вых} = \frac{c_2^2}{2}, \quad (6)$$

где  $c_2$  – абсолютная скорость потока на выходе из РК.

Коэффициенты скорости  $\phi$  и  $\psi$  определялись на основе эмпирических зависимостей для расчета потерь в элементах проточной части. Зависимости потерь как функции от  $\bar{H}_T$  представлены на рис. 7–9. Видно, что потери в СА стабильно возрастают с увеличением  $\bar{H}_T$  (рис. 8). Изменение  $\alpha_1$  в диапазоне от  $12^\circ$  до  $18^\circ$  на величину потерь практически не влияет. При переходе к  $\alpha_1 = 21^\circ$  и  $25^\circ$  потери начинают возрастать.

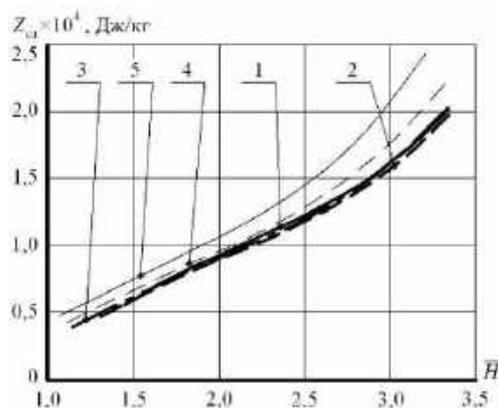


Рис. 7. Зависимости потерь в СА:  
1 –  $\alpha_1 = 12^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = 15^\circ$ ; 3 –  $\alpha_1 = 18^\circ$ ;  
4 –  $\alpha_1 = 21^\circ$ ; 5 –  $\alpha_1 = 25^\circ$

Зависимость потерь в РК приведена на рис. 9. Можно выделить три характерных участка. Участок 1 (диапазон значений  $\bar{H}_T = 1-1,7$ ): потери уменьшаются с увеличением  $\bar{H}_T$ , но интенсивно растут с уменьшением  $\alpha_1$ . Участок 2 ( $\bar{H}_T = 1,7-2,46$ ): характерны наименьшие потери во всем диапазоне изменений  $\bar{H}_T$ , практически одинаковые – при различных  $\alpha_1$  на концах участка и слабое снижение – при уменьшении  $\alpha_1$  в средней его зоне. Участок 3 ( $\bar{H}_T = 2,46-3,3$ ): потери возрастают с увеличением  $\bar{H}_T$  и уменьшением  $\alpha_1$ .

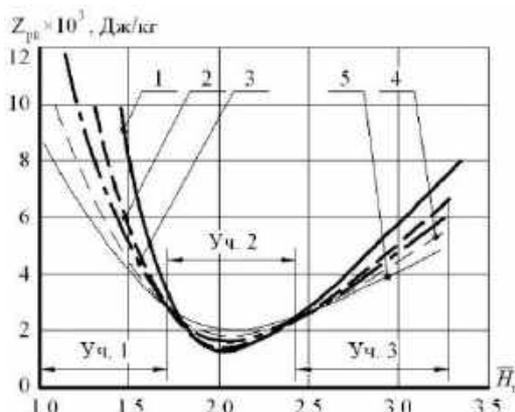


Рис. 8. Зависимости потерь в РК:  
 1 –  $\alpha_1 = 12^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = 15^\circ$ ; 3 –  $\alpha_1 = 18^\circ$ ;  
 4 –  $\alpha_1 = 21^\circ$ ; 5 –  $\alpha_1 = 25^\circ$

Для потерь с выходной скоростью характерно наличие двух участков (рис. 9), разделяемых значениями  $\bar{H}_T$ . На первом участке ( $\bar{H}_T = 1,5-1,6$ ) потери уменьшаются с увеличением  $\bar{H}_T$  и практически не зависят от величины  $\alpha_1$ . На втором участке ( $\bar{H}_T = 1,6-3,3$ ) потери интенсивно растут как с увеличением  $\bar{H}_T$ , так и с увеличением угла выхода потока из СА. Выявлено, что в общем балансе потерь их доля в СА незначительна, как и влияние на КПД турбины. Сопоставление результатов по потерям (рис. 3) показывает, что на первом участке ( $\bar{H}_T = 1,1-1,9$ ) определяющими для изменения КПД являются потери в РК, а на втором участке ( $\bar{H}_T = 1,9-3,3$ ) – потери с выходной скоростью. Таким образом, на первом участке с уменьшением  $\alpha_1$  происходит интенсивное увеличение потерь в РК – при слабо зависящих от  $\alpha_1$  потерях с выходной скоростью. На втором участке картина меняется: с уменьшением  $\alpha_1$  потери в РК также увеличиваются, но потери с выходной

скоростью интенсивно снижаются, что компенсирует увеличение потерь в РК.

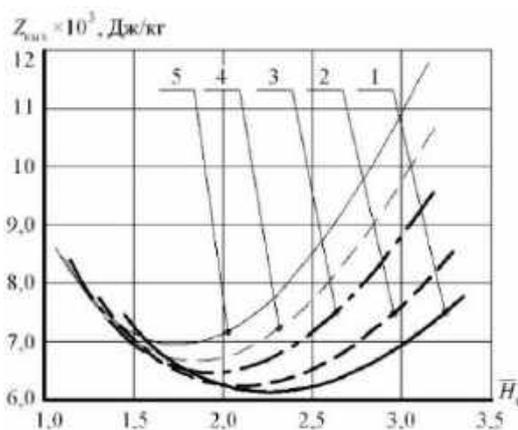


Рис. 9. Зависимости потерь с выходной скоростью:  
 1 –  $\alpha_1 = 12^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = 15^\circ$ ; 3 –  $\alpha_1 = 18^\circ$ ;  
 4 –  $\alpha_1 = 21^\circ$ ; 5 –  $\alpha_1 = 25^\circ$

### Заключение

Впервые определены оптимальные значения  $\alpha_1$  с учетом располагаемого теплоперепада и режима работы. Это позволило выдать ряд рекомендаций для задач проектирования проточных частей РОТ.

1. Выбор величины угла выхода сопел СА должен осуществляться с учетом располагаемого теплоперепада выбранного режима работы.

2. При проектировании турбин на значения  $\bar{H}_T < 1,9$  следует принимать  $20^\circ \leq \alpha_1 \leq 25^\circ$ , а для  $\bar{H}_T \geq 1,9$  – ориентироваться на  $\alpha_1 < 18^\circ$ .

3. При отсутствии лимитирующих факторов для РОТ целесообразно принимать повышенные значения коэффициента напора ( $\bar{H}_T \geq 1,9$ ). В этом случае величины угла можно принимать из условия обеспечения заданной пропускной способности турбины при сохранении достаточного КПД (ориентировочно  $\alpha_1 \leq 20-22^\circ$ ).

4. Для РОТ большинство методик рекомендует принимать значения в диапазоне  $\rho_T = 0,4-0,55$ . Однако полученные результаты свидетельствуют в пользу более низких значений ( $\rho_T = 0,352-0,362$ ).

5. При проектировании турбины, работающей в составе турбокомпрессора агрегата наддува поршневого ДВС, рекомендуется принимать увеличенные значения  $\alpha_1$  (но не более  $25^\circ$ ), обеспечивающие повышенные значения пропускной способности и мощности при достаточном уровне КПД.

### Литература

1. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A.Yu., Fershalov M.Yu. Microturbine with new design of nozzles. Energy. 2018, Vol. 157, p. 615-624. DOI:10.1016/j.energy.2018.05.153
2. Fershalov A.Yu., Fershalov Yu.Ya., Fershalov M.Yu. Principles of designing gas microturbine stages. Energy. 2021, Vol. 218, 119488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119488>
3. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центробежной турбины на стационарных и переходных режимах. М.: Машиностроение, 1974. 228 с.
4. Мидзумати Н. Исследование радиальных газовых турбин. М.: Машгиз, 1961. 120 с.
5. Одиванов Л.Н., Тунаков А.П. Исследование радиально-осевой турбины турбокомпрессора // Энергомашиностроение. 1964. № 9. С. 23-26.
6. Кельштейн Д.М. Угол установки сопловых лопаток для новой конструкции входного направляющего аппарата турбины турбокомпрессора // Двигатели внутреннего сгорания. Харьков, 1966. Вып. 3. С. 71-74.
7. Dixon S.L. Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. Oxford, Butterworth-Heinemann, 1998, 322 p.

8. Galindo J., Fajardo P., Navarro R., Garcia-Cuevas L.M. Characterization of a radial turbocharger turbine in pulsating flow by means of CFD and its applications to engine modeling. *Applied Energy*. 2013, N 103, pp. 116-127. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.09.013
9. Newton P., Martinez-Botas R., Seiler M. A three-dimensional computational study of pulsating flow inside a double entry turbine. *Journal of Turbomachinery*. 2014, Vol. 137, pp. 1-10. DOI: 10.1115/1.4028217
10. Sanaye S., Ghadikolaee S.S., Akbari A. A new method for optimum selection of two-stage turbocharger for heavy duty diesel engine. *International journal of heavy vehicle systems (IJHVS)*. 2015, Vol. 22, N 1, pp. 42-72. DOI: 10.1504/IJHVS.2015.070416
11. Mamat A.M.I., Romagnoli A., Martinez-Botas R. Design and development of a low pressure turbine for turbocompounding applications. *International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems*. 2012, Vol. 4, N 3, pp. 1-8. DOI:10.38036/jgpp.4.3\_1
12. Jiao K., Sun H., Li X., Wu H., Krivitzky E., Schram T., Larosiliere L.M. Numerical simulation of air flow through turbocharger compressors with dual volute design. *Applied Energy*. 2009, N 86(11), pp. 2494-2506. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.02.19
13. Abdelmadjid C., Mohamed S.A., Boussad B. CFD analysis of the volute geometry effect on the turbulent air flow through the turbocharger compressor. *Energy Procedia*. 2013, N 36, pp. 746-755. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.087
14. Jiao K., Sun H., Li X., Wu H., Krivitzky E., Schram T., Larosiliere L.M. Numerical investigation of the influence of variable diffuser vane on the performance of a centrifugal compressor. *Journal of Automobile Engineering*. 2009, N 223(8), pp. 1061-1070. DOI: 10.1243/09544070JAUTO1202
15. Kou H.J., Lin J.S., Zhang J.H. Numerical study on vibration stress of rotating fan blade under aerodynamic load at critical speed. *Journal of Aerospace Engineering*. 2015. N 230(6), pp. 1044-1058. DOI: 10.1177/0954410015603071.
16. Чумаков Ю.А. Теория и расчет транспортных газотурбинных двигателей. М.: ИНФРА-М; Форум, 2012. 448 с.
17. Chen L., Luo J., Sun F., Wu C. Design efficiency optimization of one-dimensional multi-stage axial flow compressor. *Applied Energy*. 2008, N 85, pp. 625-633. DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.10.003
18. Bayomi N.N., Abd El-Maksoud R.M. Two operating modes for turbocharger system. *Energy Conversion and Management*. 2012. N 58, pp. 59-65. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.003.
19. Binder N., Garcia B.J., Carbonneau X. Dynamic response in transient operation of a variable geometry turbine stage: Influence of the aerodynamic performance. *International Journal of Rotating Machinery*. 2013. Article ID 735321. pp. 1-11. DOI: 10.1155/2013/735321.
20. Ghasemi S., Shirani E., Hajilouy-Benisi A. Performance prediction of twin-entry turbocharger turbines. *Turbo Expo 2002: ASME*. Vol. 1, p. 1087-1095. DOI: 10.1115/GT2002-30576
21. Lebele-Alawa B.T., Hart H.I., Ogaji S.O.T., Probert S.D. Rotor-blades profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness. *Applied Energy*. 2008, N 85, pp. 494-505. DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.12.001
22. Лашко В.А., Пассар А.В. Расчет потерь кинетической энергии в проточной части турбины как одна из проблем при реализации комплексного подхода // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. № 1(20). С. 79-90.

#### References

1. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A.Yu., Fershalov M.Yu. Microturbine with new design of nozzles. *Energy*. 2018, Vol. 157, p. 615-624. DOI:10.1016/j.energy.2018.05.153
2. Fershalov A.Yu., Fershalov Yu.Ya., Fershalov M.Yu. Principles of designing gas microturbine stages. *Energy*, 2021, Vol. 218, 119488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119488>
3. Mitrohin V.T. Vybor parametrov i raschet centrostremitel'noj turbiny na stacionarnyh i perehodnyh rezhimakh [Selection of parameters and calculation of a centripetal turbine in stationary and transient modes]. М.: Mashinostroenie, 1974. 228 s.
4. Midzumati N. Issledovanie radial'nyh gazovyh turbin [Research of radial gas turbines]. М.: Mashgiz, 1961. 120 s.
5. Odivanov L.N., Tunakov A.P. Issledovanie radial'no-osevoj turbiny turbokompressora turbin [Research of a radial-axial turbine of a turbocompressor]. *Jenergomashinostroenie*. 1964. № 9. S. 23-26.
6. Kel'shtejn D.M. Ugol ustanovki soplovyh lopatok dlja novoj konstrukcii vhodnogo napravljajushhego apparata turbiny turbokompressora turbin [Installation angle of nozzle blades for a new design of the turbocharger turbine inlet guide vane]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. Har'kov, 1966. Vyp. 3. S. 71-74.
7. Dixon S.L. Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. Oxford, Butterworth-Heinemann, 1998, 322 p.
8. Galindo J., Fajardo P., Navarro R., Garcia-Cuevas L.M. Characterization of a radial turbocharger turbine in pulsating flow by means of CFD and its applications to engine modeling. *Applied Energy*. 2013, N 103, pp. 116-127. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.09.013
9. Newton P., Martinez-Botas R., Seiler M. A three-dimensional computational study of pulsating flow inside a double entry turbine. *Journal of Turbomachinery*. 2014, Vol. 137, pp. 1-10. DOI: 10.1115/1.4028217
10. Sanaye S., Ghadikolaee S.S., Akbari A. A new method for optimum selection of two-stage turbocharger for heavy duty diesel engine. *International journal of heavy vehicle systems (IJHVS)*. 2015, Vol. 22, N 1, pp. 42-72. DOI: 10.1504/IJHVS.2015.070416
11. Mamat A.M.I., Romagnoli A., Martinez-Botas R. Design and development of a low pressure turbine for turbocompounding applications. *International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems*. 2012, Vol. 4, N 3, pp. 1-8. DOI:10.38036/jgpp.4.3\_1
12. Jiao K., Sun H., Li X., Wu H., Krivitzky E., Schram T., Larosiliere L.M. Numerical simulation of air flow through turbocharger compressors with dual volute design. *Applied Energy*. 2009, N 86(11), pp. 2494-2506. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.02.19

13. Abdelmadjid C., Mohamed S.A., Boussad B. CFD analysis of the volute geometry effect on the turbulent air flow through the turbocharger compressor. *Energy Procedia*. 2013, N 36, pp. 746-755. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.087.
14. Jiao K., Sun H., Li X., Wu H., Krivitzky E., Schram T., Larosiliere L.M. Numerical investigation of the influence of variable diffuser vane on the performance of a centrifugal compressor. *Journal of Automobile Engineering*. 2009, N 223(8), pp. 1061-1070. DOI: 10.1243/09544070JAUTO1202
15. Kou H.J., Lin J.S., Zhang J.H. Numerical study on vibration stress of rotating fan blade under aerodynamic load at critical speed. *Journal of Aerospace Engineering*. 2015. N 230(6), pp. 1044-1058. DOI: 10.1177/0954410015603071.
16. Chumakov YU.A. Teoriya i raschet transportnykh gazoturbinnnykh dvigateley [Theory and calculation of transport gas turbine engines]. M.: INFRA-M; Forum, 2012. 448 s.
17. Chen L., Luo J., Sun F., Wu C. Design efficiency optimization of one-dimensional multi-stage axial flow compressor. *Applied Energy*. 2008, N 85, pp. 625-633. DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.10.003.
18. Bayomi N.N., Abd El-Maksoud R.M. Two operating modes for turbocharger system. *Energy Conversion and Management*. 2012. N 58, pp. 59-65. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.003.
19. Binder N., Garcia B.J., Carbonneau X. Dynamic response in transient operation of a variable geometry turbine stage: Influence of the aerodynamic performance. *International Journal of Rotating Machinery*. 2013. Article ID 735321. pp. 1-11. DOI: 10.1155/2013/735321.
20. Ghasemi S., Shirani E., Hajilouy-Benisi A. Performance prediction of twin-entry turbocharger turbines. *Turbo Expo 2002: ASME*. Vol. 1, p. 1087-1095. DOI: 10.1115/GT2002-30576
21. Lebele-Alawa B.T., Hart H.I., Ogaji S.O.T., Probert S.D. Rotor-blades profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness. *Applied Energy*. 2008, N 85, pp. 494-505. DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.12.001
22. Lashko V.A., Passar A.V. Raschet poter` kineticheskoy energii v protochnoy chasti turbiny kak odna iz problem pri realizatsii kompleksnogo podkhoda [Calculation of kinetic energy losses in the turbine flow path as one of the problems in the implementation of an integrated approach]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. № 1(20). S. 79-90.

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

**Андрей Владимирович Пассар**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Численные методы математической физики» Вычислительного центра ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, e-mail: passar\_av@mail.ru

**Andrey V. Passar**, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Computer Center of Far East Branch of the of the Russian Academy of Science. 65, Kim U Chena St., Khabarovsk, Russian Federation, 680000, e-mail: passar\_av@mail.ru

**Денис Владимирович Тимошенко**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Тихоокеанский государственный университет. 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, e-mail: 000595@pnu.edu.ru

**Denis V. Timoshenko**, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, Pacific State University. 136 Tikhookenskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation, e-mail: 000595@pnu.edu.ru

**Юрий Яковлевич Фершалов**, доктор технических наук, профессор, профессор Отделения машиностроения, морской техники и транспорта Инженерного департамента Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: FershalovJuriy@mail.ru

**Yuri Ya. Fershalov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Departments of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Faculty of Engineering, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russian Federation, 690922, e-mail: FershalovJuriy@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 04.12.2022.

Научная статья

УДК 621.892.096.1: 65.011.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.018>

## Расчетно-экспериментальное моделирование влияния угара смазочного масла на состояние судового тронкового дизеля

М.И. Тарасов<sup>1</sup> Nadezkin@msun.ru, Г.П. Кича<sup>1</sup> Kicha@msun.ru,

А.В. Надежкин<sup>1</sup> Nadezkin@msun.ru

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

**Аннотация.** По результатам моторных испытаний одноцилиндрового отсека ЧН18/22 идентифицировано влияние угара смазочного масла на изнашивание и нагарообразование деталей поршневой группы судового дизеля. Цель лабораторного эксперимента состояла в выявлении связи эксплуатационных характеристик применяемых горюче-смазочных материалов и форсировки рабочего процесса дизеля с его состоянием. Рассмотрено взаимодействие этих компонентов, обусловленное угаром масла и проявляемое через маслообмен в цилиндре и в смазочной системе тронкового двигателя. Показано, что угар масла может характеризовать конструктивное совершенство и технический уровень двигателя, через который проявляется требологическое и химмотологическое взаимодействие звеньев комплекса «дизель – топливо – масло – угар» при формировании в нем процессов изнашивания и нагарообразования.

Моторным экспериментом выявлена интенсификация этих процессов при угаре масла ниже 1,2 и выше 2,5 г/(кВт·ч). На основе расчетно-экспериментального моделирования с использованием теории планирования эксперимента разработана модель изнашивания основных деталей двигателя и нагарообразования его поршней в зависимости от угара масла, качества применяемых топлив и масел, уровня форсировки дизеля. Установлено, что самые благоприятные условия для старения моторного масла в картере тронкового двигателя наблюдается при угаре 1,7–2,5 г/(кВт·ч). В этих условиях маслообмена, обусловленного доливками свежего масла для компенсации угоревшего, состояние цилиндра-поршневой группы обеспечивает надежную работу дизеля в течение длительного срока службы.

Практическая ценность проведенных исследований состоит в выявлении зоны угара, когда изнашивание и нагарообразование протекают с наименьшей интенсивностью. Установлено возрастание изнашивания и нагарообразования при повышенном угаре. Нижний уровень угара масла в большей мере лимитируется повышением изнашивания, а верхний – нагарообразованием. Тяжелые условия функционирования высокофорсированного двигателя с наддувом при применении высоковязких топлив по рассматриваемым функциям отклика не могут быть полностью компенсированы до уровня сжигания дистиллятов подбором масла с высокими эксплуатационными свойствами.

**Ключевые слова:** изнашивание двигателя, нагарообразование поршней дизеля, угар масла, старение моторного масла, система смазки двигателя, техническое состояние двигателя, испытание дизеля.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность Соболенко Анатолию Николаевичу доктору технических наук, профессору за предоставленные ценные замечания при подготовке данной рукописи.

**Для цитирования:** Тарасов М.И., Кича Г.П., Надежкин А.В. Расчетно-экспериментальное моделирование влияния угара смазочного масла на состояние судового тронкового дизеля. 2022. № 3 часть 1, С. 136—146.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.018>

## Computational and experimental modeling of the influence of lubricating oil waste on the state of a ship trunk diesel engine

Maxim I. Tarasov<sup>1</sup> Nadezkin@msun.ru, Gennadiy P. Kicha<sup>1</sup> Kicha@msun.ru,

Andrey V. Nadezhkin<sup>1</sup> Nadezkin@msun.ru

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

**Abstract.** According to the results of motor tests of the single-cylinder section of ChN18/22, the influence of the waste of lubricating oil on the wear and carbon formation of parts of the piston group of a marine diesel engine was identified. The purpose of the laboratory experiment was to identify the relationship between the operational characteristics of the used fuels and lubricants and forcing the working process of a diesel engine with its state. The interaction of these components, caused by oil waste and manifested through oil exchange in the cylinder and in the lubrication system of the trunk engine, is considered. It is shown that oil waste can characterize the design perfection and technical level of the engine, through which the trebological and chemotological interaction of the links of the "diesel - fuel - oil - waste" complex manifests itself during the formation of wear and carbon formation processes in it.

The motor experiment revealed the intensification of these processes when the oil burns out below 1.2 and above 2.5 g/(kW·h). On the basis of computational and experimental modeling using the theory of experimental planning, a model was developed for the wear of the main engine parts and carbon formation of its pistons, depending on the oil burnout, the quality of the fuels and oils used, and the level of diesel engine boost. It has been established that the most favorable conditions for the aging of engine oil in the crankcase of a trunk engine are observed with a burnout of 1.7–2.5 g/(kW·h).

Under these conditions of oil exchange, due to the addition of fresh oil to compensate for burnt oil, the state of the cylinder-piston group ensures reliable operation of the diesel engine for a long service life.

The practical value of the research carried out consists in identifying the burn-out zone, when wear and carbon formation occur with the least intensity. An increase in wear and carbon formation with increased fumes has been established. The lower level of oil waste is to a greater extent limited by an increase in wear, and the upper level is limited by carbon formation. The harsh operating conditions of a highly accelerated turbocharged engine when using high-viscosity fuels, according to the response functions under consideration, cannot be fully compensated for up to the level of distillate combustion by selecting an oil with high performance properties.

The practical value of the research carried out consists in identifying the burn-out zone, when wear and carbon formation occur with the least intensity. An increase in wear and carbon formation with increased fumes has been established. The lower level of oil waste is to a greater extent limited by an increase in wear, and the upper level is limited by carbon formation. The harsh operating conditions of a highly accelerated turbocharged engine when using high-viscosity fuels, according to the response functions under consideration, cannot be fully compensated for up to the level of distillate combustion by selecting an oil with high performance properties.

**Keywords:** engine wear, diesel piston carbonization, oil waste, engine oil aging, engine lubrication system, engine technical condition, diesel testing

**Acknowledgments:** *The authors are grateful to Anatoly Nikolaevich Sobolenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, for providing valuable comments during the preparation of this manuscript.*

**For citation:** Maxim I. Tarasov, Gennadiy P. Kicha, Andrey V. Nadezhkin Computational and experimental modeling of the influence of lubricating oil waste on the state of a ship trunk diesel engine. 2022. № 3 part 1. P. 136—146.

### Введение

Снижение расхода смазочного (моторного) масла (ММ) в судовых тронковых дизелях является составной частью решения проблемы ресурсосберегающей их эксплуатации. Угар масла при смазке цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) доминирует и его доля в общем расходе ММ составляет 30–80 % [1, 2]. Снижение угара смазочного масла конструктивными и эксплуатационными методами приводит к уменьшению маслообмена из-за более редкого компенсационного долива его, что ускоряет старение циркулирующего в системе смазки (СС) рабочего тела.

Из-за недостаточного интенсивного поступления масла в ЦПГ при низком угаре возрастает изнашивание поршневых колец и цилиндрических втулок [3]. Обильное же попадание ММ в камеру сгорания двигателя вызывает повышенное нагарообразование на поршнях [2, 4].

Вопросы оптимизации подачи (поступления) смазочного масла на цилиндрическую втулку тесным образом связаны с конструктивными особенностями двигателя, уровнем его форсировки по среднему эффективному давлению и тепловой напряженности деталей ЦПГ [5, 6]. Кроме того, подача масла в поршневую группу и связанный с ней угар существенным образом зависят от технического состояния двигателя, а также от характеристик применяемых горюче-смазочных материалов (ГСМ) [7].

В большинстве случаев полагают, что увеличение угара масла улучшает, по сравнению с малым доливом, его состояние в СС из-за более интенсивного освежения. Однако данные эксплуатации ДВС показывают, что при повышенном износе ЦПГ возрастающий угар и, следовательно, интенсивный долив масла не способствуют улучшению состояния масла, так как наблюдаемое довольно часто увеличение скорости старения превышает облагораживающее действие на работающее ММ его интенсивного освежения [3, 8].

Стремление к снижению угара масла в ДВС может привести к повышенному изнашиванию и даже задирам деталей ЦПГ. В этих условиях обновление

СС свежим маслом занижено. Низкий маслообмен будет вызывать рост старения ММ, циркулирующего в СС и обеспечивающего смазку ЦПГ и охлаждение поршня. Идентификация связи угара масла (маслообмена) с изнашиванием и нагарообразованием деталей ЦПГ дизеля является актуальной задачей. Этот аспект проблемы ресурсосберегающего маслоиспользования в ДВС, когда как снижение, так и повышение угара ММ может способствовать интенсификации его старения, что неблагоприятно сказывается на состоянии дизеля, был игнорирован. Превалирует мнение, что повышенный угар улучшает маслообмен и благоприятно проявляется на состоянии двигателя, низкий же угар способствует снижению расхода масла. Действие этих факторов на ресурсные показатели (изнашивание, нагаро- и лакообразование) ДВС слабо изучено.

Необходимо продолжить исследования в направлении рационального маслоиспользования с целью показать, что угар ММ существенным образом влияет на состояние дизеля и экономичную ресурсосберегающую эксплуатацию дизеля. Снижение угара не всегда способствует экономии общего расхода ММ, так как при этом может сокращаться срок его службы и возрастать слив. Высокий угар увеличивает долю расхода масла на долив. При этом только в отдельных случаях повышенный маслообмен вызывает увеличение срока службы ММ.

Изнашивание деталей ЦПГ и нагарообразование на поршнях существенным образом зависят от угара масла [3, 8]. Как низкий, так и высокий угар интенсифицирует эти процессы, что сказывается на долговечности деталей ДВС и в целом на надежности работы двигателя. На основании выше изложенного можно отметить важность нахождения компромисса между расходом ММ и техническим состоянием дизеля, инициируемым угаром, с целью достижения ресурсосберегающего маслоиспользования в ДВС. Наиболее рациональный угар масла зависит от конструктивных особенностей и технического состояния двигателя, уровня его форсировки, режимов работы и эксплуатационных свойств (качества) применяемых топлив и смазочных масел.

### Объект и методика исследования

Наиболее продуктивно рассмотреть влияние угара масла на состояние дизеля можно по результатам его испытаний на моторном стенде [4]. Для широкого обобщения результатов эксперимента выбран объект (дизель), который характерен для наиболее распространенных на судах тронковых ДВС повышенной форсировки по среднему эффективному давлению и частоте вращения [3]. Для снижения помех от внешних условий, связанных с отклонением в рабочем процессе отдельных цилиндров, моторный эксперимент проводился на одноцилиндровом отсеке судового дизеля ЧН18/22 ( $P_{ен} = 96$  кВт,  $p_{me} = 2,2$  МПа,  $n = 16,7$  с<sup>-1</sup>). Отсек разработан с целью доводки дизеля ДД112 (6ЧСПН18/22) до уровня форсировки  $p_{me} = 2$  МПа.

Большим достоинством реализованного метода испытаний при использовании одноцилиндрового отсека для оценки влияния различных факторов, в том числе угара масла, на состояние дизеля является возможность строго выдерживать параметры эксперимента. Это позволило исключить действие многих неуправляемых факторов и четко реализовать все элементы разработанной программы испытаний. Предотвратить различного рода аномалии в рабочем процессе двигателя и в состоянии циркулирующего в СС масла гораздо легче на одноцилиндровом отсеке.

Стенд был оборудован новейшей аппаратурой управления и контроля его работой. Методы оценки состояния масла соответствовали современным воззрениям на старение ММ. Использование стенда дает возможность провести сравнительную оценку эффективности различных комбинаций сочитаний «топливо – масло» (Т–М) и рекомендовать их для использования в полноразмерных двигателях [5].

Испытание на одноцилиндровом отсеке показало ряд преимуществ в использовании его для оценки старения ММ. Стенд, на котором проведено моделирование работы комплекса «дизель – топливо – масло – угар» (ДТМУ), позволил провести моторные испытания двигателя с меньшими затратами на топливо, масло, запчасти и техобслуживание двигателя. На одноцилиндровом отсеке можно осуществлять более точный контроль параметров объекта испытаний. Стенд с моторным отсеком, по сравнению с полноразмерным двигателем, более компактен. Его вспомогательные системы меньше по размеру и позволяют более точно проводить мониторинг параметров эксперимента [4, 6].

Все системы отсека, включая воздухоснабжение (наддув), автономные, что позволяет легко регулировать и поддерживать в них контролируемые параметры. Изменение расхода ММ на угар осуществляли регулированием маслосъёмного действия поршневых колец и обмена масла между картером двигателя и цилиндрами, увеличением зазоров в поршневой группе ДВС. Стенд был оборудован комплектом контрольно-измерительных приборов для фиксирования параметров рабочего процесса и угара масла. Контроль долива и угара осуществлялся автоматически. Смазочная система отсека вместимостью 30 кг масла была оборудована полнопоточным фильтром тонкой очистки ММ с фильтрующими элементами ЭФМ 145/55.363 ( $D_n=40$  мкм). Прокачка масла через двигатель

составляла 2 м<sup>3</sup>/ч. Топливо подбиралось согласно программе испытаний. На базовых этапах использовались ГСМ одной партии выработки.

Моторный эксперимент осуществлялся этапами продолжительностью 250 ч работы двигателя ЧН18/22 на выбранном режиме по форсировке, контролируемой величиной среднего эффективного давления  $p_{me}$ . Средняя нагрузка (мощность) двигателя на идентичных режимах его работы была одинакова, задавалась с точностью до 5 %. Колебание (отклонение) её от среднего значения по нагрузочной характеристике составляло  $\pm 20$  %. Циклы смещения  $P_{ei}$  от среднего значения (по мощности и продолжительности работы) задавались согласно рекомендациям [7]. Во всех случаях средняя мощность (выработанная энергия) была постоянной для каждого конкретного этапа работы, задаваемого значением  $p_{me}$ .

Подготовка отсека к испытаниям и сам моторный эксперимент проводился с соблюдением требований ОСТ 24.060.09–89 «Дизели стационарные, судовые, тепловозные и промышленного назначения» [9]. Состояние ММ в экспериментальном отсеке контролировали путем отбора проб масла из его СС через каждые 25 ч работы. Фиксировали основные направления его старения по методикам ЦНИДИ [3, 8]. Оценку результатов моторных испытаний одноцилиндрового отсека на каждом этапе производили не только по интенсивности старения ММ, но и по состоянию загрязненности поршневой группы углеродистыми отложениями (в бальной системе) и износу деталей двигателя.

Изнашивание двигателя определяли по следующим деталям: цилиндрической втулке, поршневым кольцам и вкладышам мотылевых подшипников. Весомость вклада каждого из них в формирование показателя изнашивания двигателя  $I$  принято одинаковым. Изнашивание цилиндрической втулки фиксировали в шести поясах (по высоте) и восьмью образующим. Для этой цели на втулке прибором УПОИ–6 нарезали лунки и фиксировали их длину до и после каждого этапа испытаний. По разнице глубины лунок до и после этапа испытаний рассчитали величину изнашивания втулки (на сторону) в мкм. Используемый метод искусственных баз детально апробирован и позволяет фиксировать с высокой точностью изнашивание деталей ДВС за короткий промежуток времени их работы [3].

Изнашивание поршневых колец и вкладышей мотылевых подшипников определяли по потере их веса за этап испытаний. Взвешивание проводили на аналитических весах ВЛА–200 и 500 с высокой точностью. Износ деталей ДВС в натуральных измерениях по значению этого показателя в каждой из выше названных позиций на базовом этапе испытаний при среднем значении факторов переводили в относительные единицы. Коэффициент весомости изнашивания цилиндрической втулки, поршневых колец и вкладышей мотылевых подшипников в оценке показателя  $I$  (износ двигателя за этап испытаний) принят одинаковым для всех перечисленных деталей.

Интенсивность нагарообразования поршней за этап испытаний определяли по системе 344Т ЦНИДИ [3, 9]. Оценке в баллах подвергали поверхность головки поршня над верхним компрессионным кольцом, канавки поршневых колец и юбку поршня.

Оценка нагаров осуществлялась с учетом их толщины, твердости и относительной площади покрытия нагаром контролируемого участка поршня. Оценка величины и характера отложений в канавках поршня проводили по площади их внутренних стенок, покрытых отложениями. Толщину отложений оценивали относительно величины радиального зазора. Характер отложений рассматривался как лак, мазеобразные отложения, мягкие, средней твердости и твердые [9].

Контроль отложений лака на юбке поршня проводили в зависимости от величины поверхности, покрытой лаком, и его цвета. Состояние дренажных отверстий поршня по заполнению их отложениями и оценку нагара на перемычках поршня осуществляли аналогичным образом. Общую оценку состояния поршня по нагаро- и лакоотложению находили суммированием выше перечисленных показателей, выраженных в баллах. Относительная оценка нагарообразования велась сравнением суммарных показателей на каждом этапе испытаний с усредненным нагаром, зафиксированным на базовых (эталонных) экспериментах (опыты на нулевой точке со средним значением исследуемых факторов).

Наблюдение за изнашиванием основных деталей и нагарообразованием поршней дизелей в эксплуатации на судах показало существенное влияние на эти процессы угара ММ. Немалое значение в интенсификации как изнашивания, так и нагаро- и лакообразования особенно деталей ЦПГ, имеют применяемые топлива и смазочные масла, а также форсировка двигателя наддувом [3]. Рассматриваемые факторы были выбраны для исследования влияния их на состояние судового дизеля.

Диапазон угара масла  $g_y=1-4$  г/(кВт·ч) (табл. 1) соответствовал наиболее распространенным его границам, обусловленным конструктивными особенностями ДВС и его дрейфом в связи с изнашиванием деталей поршневой группы. Среднее его значение 2,5 г/(кВт·ч) получено по данным статистических наблюдений в течение гарантийного срока эксплуатации за судовыми тронковыми дизелями с частотой вращения  $10-20$  с<sup>-1</sup> со средним эффективным давлением  $p_{me}=1-2$  МПа на номинальных режимах работы [3].

Качество применяемых ГСМ оказывает значительное влияние на изнашивание и нагарообразование деталей дизеля. Для сокращения объема (числа этапов) эксперимента действующие процессы объединены. В эксперименте рассматривали совместное влияние на И и Н звеньев системы Т-М. Использовали их сочетания, апробированные практикой эксплуатации ДВС на судах и рекомендованные наиболее известными двигателестроительными заводами и фирмами для применения [3, 10].

Объединение звеньев в систему Т-М осуществляли через показатели их качества (эксплуатационных свойств)  $K_{TM}=K_T/K_M$ . Показатель  $K_T$  в довольно упрощенном виде через зольность, фракционный и групповой составы топлива, содержание в нем серы характеризует его влияние на процесс старения ММ и состояние дизеля [3]. Эксплуатационные свойства ММ, задавались показателем  $K_M$ , хорошо коррелирующим с состоянием ДВС. Его обобщенная величина для конкретного масла, рассчитываемая через относительные значения зольности, щелочности и концентрации многофункциональных присадок, в сравнении с рассматриваемыми параметрами базового продукта М-10ДЦЛ20 (ГОСТ 12337-2020) [11], показывает насколько ММ способно нейтрализовать вредное действие на дизель топлива, особенно при ухудшении его качества.

Таким образом, показатель  $K_{TM}$ , характеризующий качество системы Т-М в воздействии на дизель, в диапазоне 0,6-1,4 при среднем значении 1,0 позволяет количественно оценить влияние ГСМ на состояние дизеля. При этом рассматриваются наиболее эффективные сочетания этих звеньев, апробированные практикой эксплуатации ДВС, что значительно сокращает объем экспериментальных исследований.

Форсирование дизелей рассматриваемого класса наддувом на среднем режиме работы находилось в пределах  $p_{me}=0,6-1,8$  МПа. В этом диапазоне варьирования при форсировке  $p_{me}=1,2$  МПа на основном уровне был выбран последний фактор для проведения эксперимента на одноцилиндровом отсеке.

Таблица 1

Величины уровней и интервалов варьирования факторов в эксперименте

Факторы	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			нижний -1	Основной 0	Верхний +1
Удельный угар масла $g_y$ , г/(кВт·ч)	$x_1$	1,5	1	2,5	4
Качество применяемых топлив и масел $K_{TM}$ , отн. ед.	$x_2$	0,4	0,6	1	1,4
Форсировка (средняя нагрузка) двигателя $p_{me}$ , МПа	$x_3$	0,6	0,6	1,2	1,8

Уровни и интервалы варьирования выше перечисленных факторов (см. табл. 1) были выбраны для разработки модели влияния угара ММ и наиболее существенных факторов на состояние судового тронкового дизеля по изнашиванию и нагаро- и лакообразованию.

Износный эксперимент с оценкой нагаро- и лакообразования моторного отсека ЧН18/22 проводился совместно с оценкой влияния факторов  $g_y$ ,  $K_{TM}$  и  $p_{me}$  на старение ММ. Использовали

некомпозиционный план второго порядка для трех факторов (табл. 2). Коэффициенты для уравнений изнашивания и нагарообразования были определены с помощью метода наименьших квадратов. Для нахождения коэффициентов уравнений использовались формулы, приведенные в монографии [3].

Дисперсию воспроизводимости  $S_{yи}^2$  и  $S_{yн}^2$  определили по результатам опытов в центре плана

( $n_0 = 3$ ) через сумму квадратов отклонений  $S_E$ , равную 72 и 54,1, экспериментальных значений от среднего уровня в нулевой точке. Полученные величины дисперсий воспроизводимости использовали для нахождения дисперсий, характеризующих ошибки в определении коэффициентов уравнений регрессии. На основе формул для  $s^2\{b_0\}, s^2\{b_i\}, s^2\{b_{ii}\}, s^2\{b_{ij}\}$  [3, 12] через среднеквадратичное значение ошибки в

определении коэффициентов и табличного критерия  $t_T=4,3$  (при числе степеней свободы, равном 2, и 5%-ном уровне значимости) определяли доверительные интервалы коэффициентов полинома (табл. 3).

В модели изнашивания коэффициенты  $b_{22}$  и  $b_{33}$  (см. табл. 2) меньше доверительного интервала, поэтому их можно признать статистически незначимыми и исключить из уравнения регрессии. После исключения этих коэффициентов уравнение принимает вид

$$y_{II} = 100 + 26x_1 + 46,8x_2 + 36,8x_3 - 15,5x_1x_2 - 13,5x_1x_3 + 26,5x_2x_3 + 39,8x_1^2 \quad (1)$$

Таблица 2

Матрица некомпозиционного плана для идентификации изнашивания и нагаро- и лакообразования одноцилиндрового отсека дизеля ЧН18/22

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{23}$	$x_{11}$	$x_{22}$	$x_{33}$	$U_{II}$	$\hat{y}_{II}$	$U_H$	$\hat{y}_H$
1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	213	198,3	231	225,3
2	1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	152	135,8	143	148,2
3	1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	166	177,3	143	141,3
4	1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0	43	52,8	63	64,2
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	101,4	100	100,0
6	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	171	190,3	214	222,9
7	1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1	132	143,8	157	147,3
8	1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1	172	165,3	134	138,9
9	1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1	79	64,8	68	63,3
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106	101,4	95	100,0
11	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	217	211,4	222	216,3
12	1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1	83	84,9	128	140,7
13	1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1	69	64,9	148	139,2
14	1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1	41	44,4	62	63,5
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	101,4	105	100,0
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$S_E$	$S_R$	$F_P$	$F_T$
<i>И</i>	100,0	26,0	46,8	36,8	-15,5	-13,5	26,5	39,8	3,8	-1,3	72,0	1601,7	8,5	19,3
<i>Н</i>	100,0	42,0	38,6	37,8	2,1	-2,1	1,8	24,0	20,8	19,1	54,1	604,3	3,4	19,3

Таблица 3

Доверительные границы коэффициентов уравнений

Интервал коэффициентов	Величины интервалов	
	Изнашивание	Нагарообразование
$\Delta b_0$	14,9	12,9
$\Delta b_i$	9,1	7,9
$\Delta b_{ii}$	12,9	11,2
$\Delta b_{ij}$	13,4	11,6

Так как незначимыми оказались коэффициенты при квадратичном члене, все остальные коэффициенты пересчитывали с использованием метода наименьших квадратов. Для этого по выражению (1) составляли согласно табл. 2 систему нормальных уравнений и решали её. В результате

получили скорректированное уравнение следующего вида за счет отбрасывания  $b_{22}$  и  $b_{33}$

$$y_{II} = 101,4 + 26x_1 + 46,8x_2 + 36,8x_3 - 15,5x_1x_2 - 13,5x_1x_3 + 26,5x_2x_3 + 39,6x_1^2 \quad (2)$$

При корректировке уравнения (1) произошло незначительное изменение только свободного члена  $b_0$ . Этой корректировкой можно пренебречь, так как в

исходной позиции моделирования было принято, что базой отсчета изнашивания двигателя (100 %) по основным его деталям является изнашивание в нулевой точке в центре плана (этапы 5, 10 и 15).

Обработка результатов экспериментов по нагарообразованию (см. табл. 2) привело к уравнению

$$y_H = 100 + 42x_1 + 38,6x_2 + 37,8x_3 + 24,0x_1^2 + 20,5x_2^2 + 19,1x_3^2. \quad (3)$$

Так как эффекта взаимодействия факторов при оценке нагаров поршней не выявлено, то корректировать зависимость (3) при исключении из уравнения слагаемых с коэффициентами  $b_{12}$ ,  $b_{13}$  и  $b_{23}$  нет необходимости.

Адекватность полученных моделей проверяли по F-критерию. Для этой цели вычисляли значения критерия адекватности  $S_{ад}^2$  через сумму  $S_R$  квадратов отклонений экспериментальных значений  $y_j$  от расчетных  $\hat{y}_j$  во всех точках плана (15 этапов) по процессам изнашивания и нагарообразования. При значениях  $S_R=1607$  (для первого процесса) и  $S_R=664,3$  – второго, значение дисперсий адекватности соответственно равно

$$S_{адИ}^2 = \frac{S_R - S_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{1607 - 72}{15 - 8 - (3 - 1)} = 305,9;$$

$$S_{адН}^2 = \frac{664,3 - 54,1}{15 - 7 - (3 - 1)} = 91,7,$$

где  $k'$  – число коэффициентов аппроксимированного полинома;  $N$ ,  $n_0$  – число опытов в матрице планирования и в центре плана.

В обоих случаях расчетные значения критерия Фишера оказались меньше табличного:

$$F_{РИ} = \frac{S_{адИ}^2}{S_{уИ}^2} = \frac{305,9}{36} = 8,5 < F_T = 19,3;$$

$$F_{РН} = \frac{S_{адН}^2}{S_{уН}^2} = \frac{91,7}{27,05} = 3,4 < F_T = 19,3.$$

Следовательно полученные модели изнашивания и нагарообразования адекватны при 5 %-ном уровне значимости экспериментальным данным по влиянию факторов  $g_y$ ,  $K_{TM}$  и  $p_{me}$  на состояние дизеля.

Перевод формул (1) и (3) из кодированного значения факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  в натуральные  $g_y$ ,  $K_{TM}$  и  $p_{me}$  осуществлялось по формулам (уровни и интервалы приведены в табл. 1)

$$x_1 = \frac{g_y - 2,5}{1,5}; x_2 = \frac{K_{TM} - 1}{0,4}; x_3 = \frac{p_{me} - 1,2}{0,6}.$$

Выражения для расчета изнашивания и нагарообразования при представлении факторов в натуральном выражении имеют вид

$$I = -0,5 - 27,3g_y + 49,1K_{TM} - 11,6p_{me} - 25,8g_yK_{TM} + 110,4K_{TM}p_{me} - 15g_y p_{me} + 17,7g_y^2, \quad (4)$$

$$H = 129,1 - 25,3g_y - 159,8K_{TM} - 64,3p_{me} + 10,7g_y^2 + 128,1K_{TM}^2 + 53,1p_{me}^2. \quad (5)$$

Для удобства анализа рассматриваемых процессов рационально использовать формулы (1) и (2). Зависимость (4) и (5) более наглядно представляют роль каждого фактора в изнашивании и нагарообразовании судового тронкового дизеля.

### Анализ результатов моделирования влияния звеньев комплекса «дизель – топливо – масло – угар» на изнашивание и нагарообразование дизеля

Роль каждого звена в комплексе ДТМУ во влиянии на изнашивание и нагарообразование дизеля наглядно может быть представлена по полученным моделям. Ранжирование факторов в порядке их убывания с учетом действия как линейных, так и квадратичных эффектов позволяет расположить их действие на изнашивание и нагарообразование в следующей последовательности – угар, топливо (масло), форсировка двигателя (см. ф. 1 и 3). Если же рассматривать только линейные эффекты, то во влиянии на изнашивание двигателя превалирует действие объединенной системы Т–М. С учетом же квадратичных эффектов наибольшее действие на функцию отклика оказывает угар масла. При этом положительное значение коэффициента  $b_{11}$  указывает на то, что изнашивание будет увеличиваться как при низком, так и высоком угаре. Характер зависимости  $y_I(x_1)$  таков, что наблюдается угар, при котором изнашивание дизеля минимально. Его значение зависит от качества применяемых ГСМ и форсировки дизеля. При представлении факторов в натуральном виде величина  $g_{ymin}$ , при котором износ минимален, находится по выражению

$$g_{ymin} = -1,159 + 0,489K_{TM} + 0,284p_{me}.$$

Величина износа при этом равна

$$I_{min} = -9,85 + 29,39K_{TM} - 23,02p_{me} + 99,41K_{TM}p_{me} - 9,48K_{TM}^2 - 3,2p_{me}^2.$$

Общий вид зависимости  $I(g_y)$  при остальных факторах, закрепленных на нижнем ( $x=-1$ ), среднем ( $x=0$ ), верхнем ( $x=+1$ ) уровнях, показывает (рис.1) более существенный скачок  $\Delta I_{0,+1}$  по сравнению  $\Delta I_{-1,0}$  при переходе от среднего к верхнему уровню факторов. Наибольшее относительное изменение износа  $\Delta I_{0,+1}/\Delta I_{-1,0}$  наблюдается при  $g_y=2,5$  г/(кВт·ч). Оно практически не меняется при переходе к угару 1 г/(кВт·ч) и значительно возрастает, если его рассматривать в относительных единицах, при переходе к угару 4 г/(кВт·ч). По абсолютной величине скачки  $\Delta I$  при переходе с одного уровня факторов на другой, в случае высокого маслообмена по сравнению с низким, уменьшаются в 1,7–3 раза (см. рис. 1).

Следует отметить, что улучшение состояния дизеля по изнашиванию, особенно деталей ЦПГ, наблюдалось только при повышении маслообмена в зависимости от уровня действующих факторов т.е. до  $g_y = 1,5$  г/(кВт·ч). Превышение этих значений угара приводило к росту  $I$ , что было обусловлено ухудшением состояния ММ. Это преломление функции в зависимости  $I(g_y)$  при верхних значениях рассматриваемых факторов наблюдается гораздо позже. При этом диапазон  $\Delta I$  со знаком минус (уменьшение изнашивания) по мере перехода от факторов нижнего уровня к верхнему возрастает.

Замечено ещё одна особенность износной модели системы ДТМУ – наличие эффектов взаимодействия факторов, которые наиболее весомы для  $x_2$  и  $x_3$  и почти в 2 раза выше по сравнению с взаимодействием  $x_1$  и  $x_2$  (см. рис. 1). Выявленная особенность проявляется через

зольность применяемых ГСМ при сжигании низкосортных топлив и озолении масел на этапах работы, форсированных высоким наддувом.

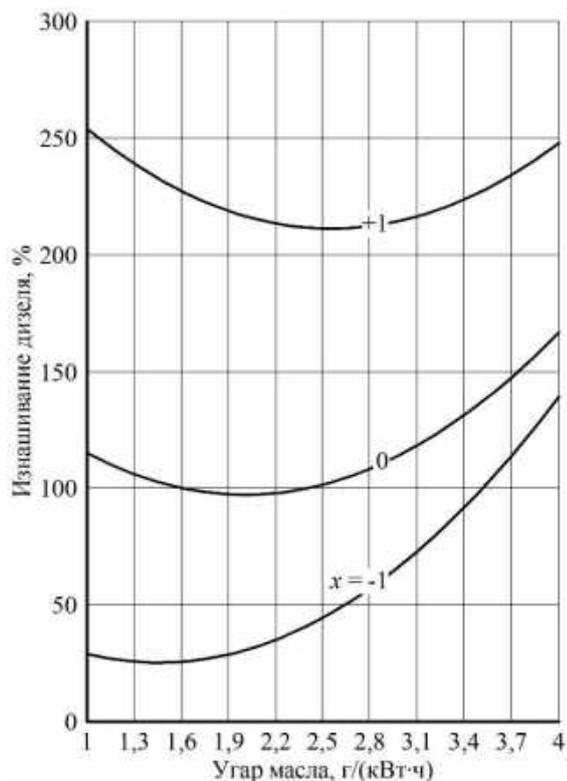


Рис. 1. Зависимость изнашивания дизеля от угара масла

О равноценном влиянии рассматриваемых факторов на нагарообразование поршней указывает незначительное отличие в значениях коэффициентов  $b_i$  и  $b_{ii}$  в уравнении (3). При этом зависимость  $H(x_i)$  практически параболическая, так как представлена взаимодействием линейного и квадратичного эффектов. Последний весом к первому. Доля его по отношению к линейному колеблется в довольно узких пределах 0,5–0,7. Незначительное отличие однотипных коэффициентов друг от друга указывает на эквидистантность зависимостей  $H(x_i)$  на всех уровнях, что наглядно иллюстрирует рис. 2. Так как эффекты взаимодействия отсутствуют, то скачки  $\Delta H$  при переходе с одного уровня на другой одинаковы при любом значении  $g_y$  в исследуемых вариантах.

Отметим главную особенность полученной зависимости по нагарообразованию. При переходе от среднего уровня факторов к верхнему, этот процесс протекает более интенсивно по сравнению с переходом от нижнего уровня к среднему. Происходит возрастание  $\Delta H$  более чем в 3 раза. При этом наиболее интенсивно прирост нагарообразования наблюдается в верхней части поршня и в канавках компрессионных колец, однако полного закоксовывания и потери подвижности колец не наблюдается.

Вторая особенность оценки состояния поршней по нагарам состоит в более интенсивном зашламлении дренажных отверстий при работе на масле с низкими моющее-диспергирующими свойствами. Это явление более выражено при

высоких угарах масла. Для низкого значения  $g_y$  и высокой форсировке рабочего процесса двигателя характерно повышенное лакообразование на юбке поршня.

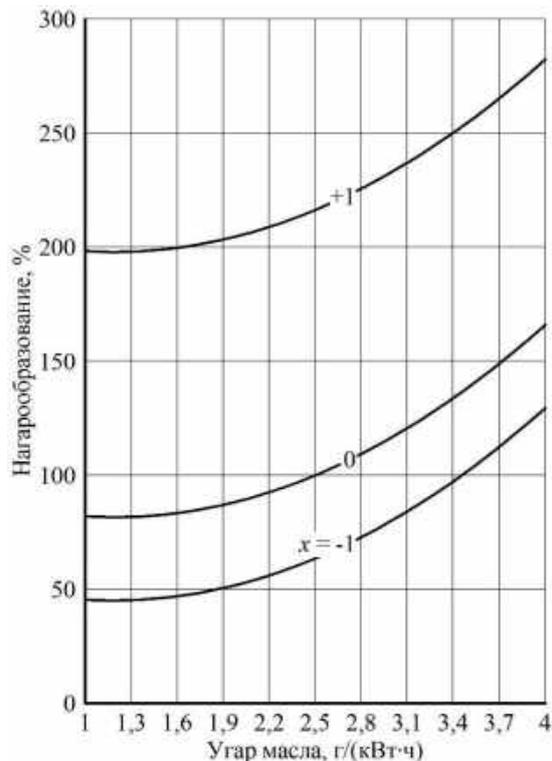


Рис. 2. Влияние угара масла на нагарообразование

Следует также отметить стабилизацию и совсем незначительное повышение интенсивности нагарообразования в диапазоне  $g_y=1-2$  г/(кВт·ч). Согласно уравнению (3) значения  $g_y$ , при которых  $H_{min}$ , соответствует 1,2 г/(кВт·ч) и имеет одну и ту же величину при нижних, средних и верхних уровнях факторов. Наблюдается некоторый сдвиг угара в сторону меньшего его значения по сравнению с уровнем, когда наблюдается наименее интенсивное старение масла. Особенно интенсивно нагарообразование растет при превышении угара 2,5 г/(кВт·ч) (см. рис. 2). Это связано с обильным проникновением масла в камеру сгорания. Выгорание ММ при значительном превышении его расхода на испарение способствует образованию нагаров в верхней части (головке) поршня и на его доннышке. Последний фактор, такой же как и образование отложений в картере установки, в моделировании состояния двигателя не учитывался.

Величина нагара на этапах испытаний в диапазоне  $g_y=1-2,5$  г/(кВт·ч), а следовательно и скорость нагарообразования, при переходе от нижнего уровня угара к среднему его значению в целом возросла на 9–15 %. При переходе от среднего к верхнему уровню  $g_y$  при всех вариациях факторов  $K_{тм}$  и  $p_{me}$   $H$  увеличилось в 1,3–2 раза, что указывает на существенную роль не только угара масла, но и качества ГСМ и форсировки двигателя в формировании нагарообразования. При этом применение ММ с высокими моющими и диспергирующе-стабилизирующими свойствами на этапах с факторами ( $x_i = +1$ ) не способно полностью

компенсировать вредное действие на этот процесс сжигания низкосортного топлива.

Для наглядности показа одновременного действия двух факторов на  $I$  и  $H$ , функции отклика представлены гиперповерхностями в трехмерной системе координат. Поверхность  $I(x_1, x_3)$  на рис. 3 иллюстрирует совместное влияние форсировки дизеля и угара масла на его изнашивание. Явно выражено наличие угара, при котором изнашивание находится на минимальном уровне. Зона  $I_{\min}$  смещается в сторону более низких значений  $g_y$  при уменьшении форсировки двигателя. При этом величина  $I_{\min}$  снижается почти в 3 раза.

Минимальное изнашивание при максимальном форсировании двигателя ( $p_{me}=1,8$ ,  $K_{TM}=0$ ) составляет 137 %, т.е. по сравнению с уровнем  $I_{\min}$  при средних значениях факторов  $x_2$ ,  $x_3$  износ вырос 1,4 раза. Седловатость зависимости  $I(x_1)$  по мере повышения форсировки двигателя падает. Увеличение изнашивания при повышении наддува двигателя во всем диапазоне угара масла из-за

низких значений коэффициентов  $b_{ii}$  близко к линейному закону. Характер зависимости  $I(x_1, x_2)$  (в статье она не приводится) в трехмерной системе координат по форме соответствует рис. 3 и проявляется более ярче, так как  $b_2 > b_3$ .

Иллюстрируется от факторов  $g_y$  и  $K_{TM}$  зависимость нагарообразования в трехмерной системе (рис. 4) указывает на экспоненциальное уменьшение показателя  $H$  по мере снижения угара и ранга системы Т-М. Экстремальные (минимальные) значения  $H$  находятся на нижней границе факторного пространства, как это видно из уравнения (3). Наибольшее нагарообразование на поршне проявляется при высоком угаре масла и  $K_{TM}=1,4$ . Такое же явление характерно и для сочетания  $g_y=4$  г/(кВт·ч) с режимом работы при форсировке  $p_{me}=1,8$  МПа. Характер поверхности функции отклика  $H(K_{TM}, g_y)$  указывает на пологость участка с координатами  $x_2$  (в относительных единицах)  $x_1, x_2 < 0$ . Участок  $x_1, x_2 > 0$  характеризует наиболее напряженное состояние двигателя по нагарообразованию.

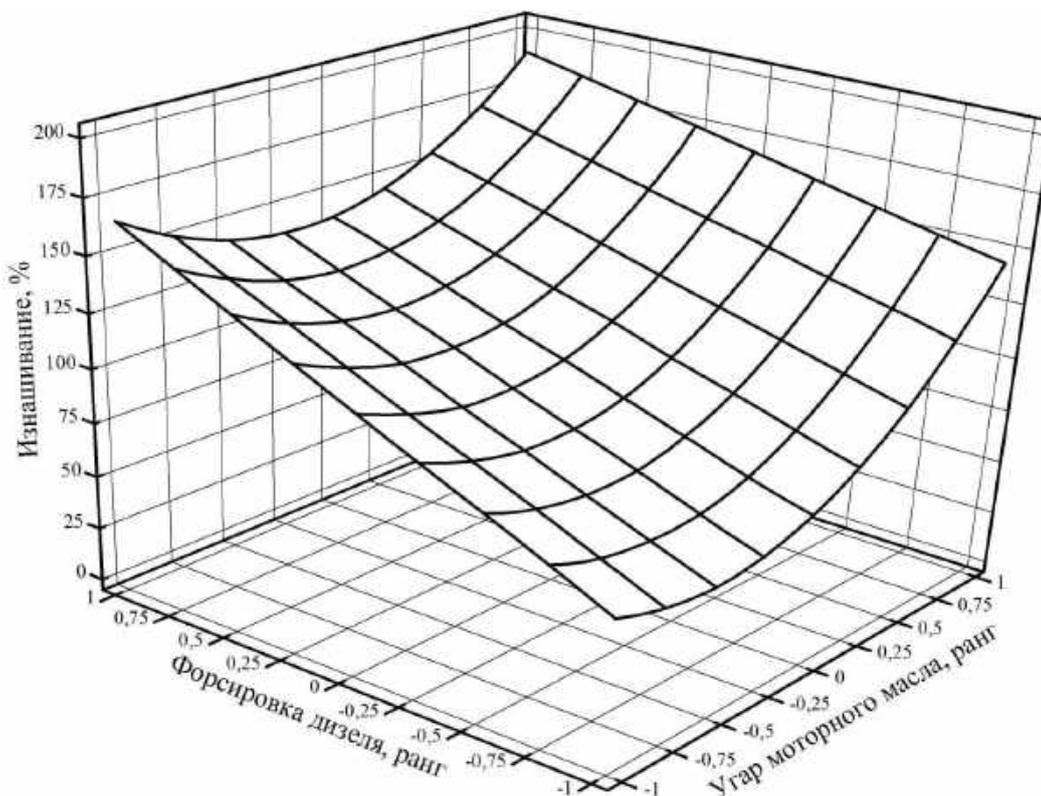


Рис. 3. Гиперповерхность функции отклика  $I$  (изнашивание) при  $K_{TM}=1$

Оценка состояния поршня по показателю  $H$  при действии на него факторов  $p_{me}$  и  $g_y$  довольно близка к результатам проведенного анализа влияния на нагарообразование факторов в сочетании  $K_{TM}$  и  $g_y$ . По уравнению (3) видно, что влияние показателя  $p_{me}$  на  $H$ , так как  $b_3 < b_2$ , менее выражено чем действие на рассматриваемый процесс фактора  $K_{TM}$ . В целом формы поверхностей отклика по показателю  $H$  рассматриваемых сочетаний факторов практически одинаковы.

Проведенный анализ позволил определить роль каждого звена в формировании состояния дизеля по таким показателям как изнашивание и

нагарообразование. Моделирование показало существенное влияние угара ММ на эти процессы, которое происходит при полном взаимодействии с качеством применяемых ГСМ и уровнем форсирования рабочих процессов дизеля. При незначительном превалировании угара в формировании показателей  $I$  и  $H$  роль факторов  $K_{TM}$  и  $p_{me}$  весьма значительна в оценке состояния звена «дизель». Следует признать, что фактор  $g_y$  как бы формирует воздействие на двигатель, поэтому учет этого фактора весьма важен для оценки надежности работы этого звена, проявляемой через  $I$  и  $H$ .

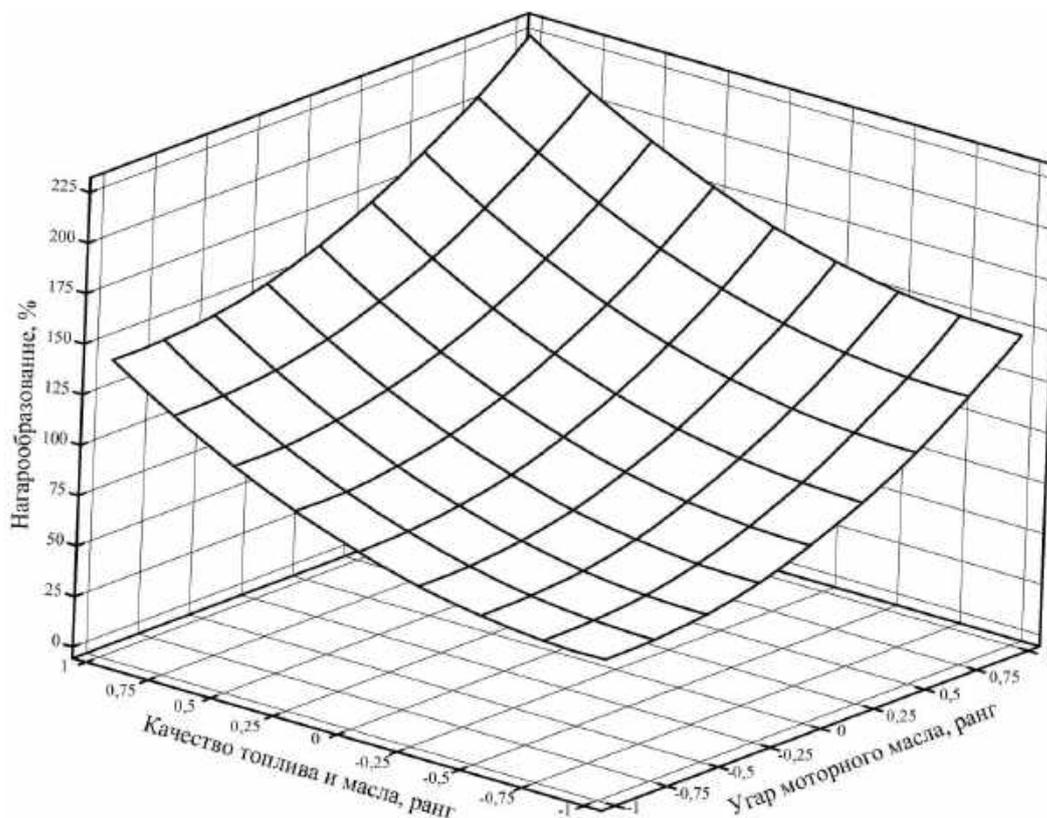


Рис. 4. Гиперповерхность функции  $H$  (нагарообразование) при  $p_{me}=1,2$  МПа

Результаты моделирования показали, что стремление к повышению экономичности дизеля по расходу ММ может сопровождаться повышением изнашивания и нагарообразования двигателя. В свою очередь высокий угар масла, не смотря на повышенный маслообмен, не всегда содействует улучшению состояния двигателя. Выявлен угар масла, при котором процессы  $I$  и  $H$  минимизированы. На состояние ММ по основным направлениям и интенсивности его старения в значительной мере влияет маслообмен, формируемый угаром. В свою очередь интенсивность старения масла зависит от его угара, качества применяемых ГСМ и уровня форсировки рабочего процесса дизеля.

### Выводы

1. Расчетно-экспериментальное моделирование влияния угара смазочного масла на состояние одноцилиндрового моторного отсека дизеля ЧН18/22 позволило выделить:

- значительную роль этого показателя в формировании изнашивания и нагаро- и лакообразования деталей цилиндра-поршневой группы двигателя;
- наличие связи угара, а следовательно и маслообмена в цилиндре и картере двигателя, со старением моторного масла и действием этого фактора на состояние двигателя;
- возможность представление угара как параметра, идентифицирующего уровень

конструкторского совершенства и технического состояния двигателя.

2. Показано, с учетом качества применяемых горюче-смазочных материалов и уровня форсировки рабочего процесса ДВС, совместное действие угара смазочного масла на изнашивание и нагарообразование судового дизеля. Воздействие выше перечисленных факторов на состояние двигателя примерно одинаково. Отмечено, что при угаре 1,2 – 2,5 г/(кВт·ч) изнашивание и нагарообразование находится на минимальном уровне. Увеличение угара выше 2,5 г/(кВт·ч) неблагоприятно сказывается на состоянии двигателя.

3. Выявлены самые благоприятные условия работы двигателей низкой и средней форсировки на дистиллятных топливах и моторных маслах со средним уровнем моющих и диспергирующе-стабилизирующих свойств с использованием многофункциональных присадок, имеющих зольность 1,5 – 3 % и щелочность 9 – 20 мг КОН/г. Применение ММ с высоким уровнем эксплуатационных свойств в дизеле средней форсировки при сжигании низкосортных высоковязких топлив ( $K_{TM}=1,4$ ) не способно полностью компенсировать их вредное действие. Изнашивание и нагарообразование дизеля ( $K_{TM}=1,4$ ), по сравнению с применением ГСМ уровня  $K_{TM}=1$ , при угаре 1,2 – 2,5 г/(кВт·ч) увеличивается в 1,5 – 2,2 раза.

### Литература

1. 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.
2. 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.
3. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В. Ресурсосберегающие маслоиспользование в судовых дизелях: монография. Владивосток: Изд-во мор. гос. ун-та, 2011. 372 с.
4. Смазочные масла для поршневых ДВС (по материалам конгресса CIMAC) // Двигателестроение. 2021. №2(284). С. 36–44.
5. Bernes, Foster, Hengeveld, Schasfoort, Scheele. Oil stress investigations in shell's Medium Speed Laboratory Engine, Paper №21, CIMAC Congress 2004.
6. Hengeveld Cannon, Scheete. A model for lubricant stress in Modern Medium Speed Diesel Engines and it's verification in a Wartsila 4120 laboratory engine, CIMAC Congress 1998, Copenhagen.
7. Дерябин А.А. Смазка и износ дизелей. Л.: Машиностроение, 1974. 184 с.
8. Никифоров О.А., Данилова Е.В. Рациональное использование моторных масел в судовых дизелях. Л.: Судостроение, 1986. 96 с.
9. ОСТ 24.060.09-89. Методика оценки моторных и физико-технических свойств масел в дизелях при стендовых испытаниях. Министерство тяжелого транспортного машиностроения. М.: ЦНИТЭИтяжмаш, 1990. 56 с.
10. Тарасов В.В., Соболенко А.Н., Тарасов М.И. Эффективность применения регенерированного моторного масла, легированного присадками в судовых дизелях разной форсировки // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №1(47). Т.2. С. 116–122.
11. Цветков О.Н., Максимов А.Л. Современность и перспективы разработки и применения моторных масел для дизелей // Двигателестроение. 2020. №4(282). С. 25–34.
12. Кича Г.П., Надежкин А.В., Глушков С.В. Комплексное системное решение проблемы ресурсосберегающего маслоиспользования в судовых дизелях // Морские интеллектуальные технологии. 2016. №3(33). Т.1. С.118-125.

### References

1. Kicha G.P., Tarasov M.I. Konstruktivnye i ekspluatatsionnye metody snizheniya ugara motornogo masla v sudovyh dizelyah [Constructive and operational methods for reducing the waste of engine oil in marine diesel engines]. // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2017. No. 3–4. P.138–143.
2. Tarasov M.I., Kicha G.P. Issledovanie vliyaniya ugara masla na ego starenie i sostoyanie malorazmernogo dizelya [Investigation of the influence of oil waste on its aging and the state of a small diesel engine]. // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2017. No. 3–4. P.143–147.
3. Kicha G.P., Perminov B.N., Nadezhkin A.V. Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovyh dizelyah [Resource-saving oil use in marine diesel engines]: monografiya. Vladivostok: Izd-vo mor. gos. un-ta, 2011. 372 s.
4. Smazochnye masla dlya porshnevyyh DVS (po materialam kongressa CIMAC) [Lubricating oils for piston internal combustion engines (based on materials from the CIMAC Congress)]. // Dvigatelistroenie. 2021. No. 2 (284). P. 36–44.
5. Bernes, Foster, Hengeveld, Schasfoort, Scheele. Oil stress investigations in shell's Medium Speed Laboratory Engine, Paper No. 21, CIMAC Congress 2004.
6. Hengeveld Cannon, Scheete. A model for lubricant stress in Modern Medium Speed Diesel Engines and it's verification in a Wartsila 4120 laboratory engine, CIMAC Congress 1998, Copenhagen.
7. Deryabin A.A. Smazka i iznos dizelej [Lubrication and wear of diesel engines]. L.: Mashinostroenie, 1974. 184 s.
8. Nikiforov O.A., Danilova E.V. Racional'noe ispol'zovanie motornyh masel v sudovyh dizelyah [Rational use of engine oils in marine diesel engines]. L.: Sudostroenie, 1986. 96 s.
9. OST 24.060.09-89. Metodika ocenki motornyh i fiziko-tekhnicheskikh svoystv masel v dizelyah pri stendovyh ispytaniyah. Ministerstvo tyazhelogo transportnogo mashinostroeniya [OST 24.060.09-89. Methodology for assessing motor and physical and technical properties of oils in diesel engines during bench tests]. M.: CNITEI-tyazhmash, 1990. 56 s.
10. Tarasov V.V., Sobolenko A.N., Tarasov M.I. Effektivnost' primeneniya regenerirovannogo motornogo masla, legirovannogo prisadkami v sudovyh dizelyah raznoj forsirovki [Efficiency of the application of regenerated motor oil alloying with additives in ship diesels of different forcing]. // Marine intellectual technologies. 2020. No. 1 (47). Part 2. P. 116–122.
11. Cvetkov O.N., Maksimov A.L. Sovremennost' i perspektivy razrabotki i primeneniya motornyh masel dlya dizelej [Modernity and prospects for the development and application of engine oils for diesel engines]. // Dvigatelistroenie. 2020. No. 4(282). P. 25–34.
12. Kicha G.P., Nadezhkin A.V., Glushkov S.V. Kompleksnoe sistemnoe reshenie problemy resursosberegayushchego masloispol'zovaniya v sudovyh dizelyah [The complex system solution of the problem of resourcesaving use of oil in marine diesel engines]. // Marine intellectual technologies. 2016. No. 3 (33). T.1. P.118–125.

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

**Максим Игоревич Тарасов**, 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

**Maxim I. Tarasov**, graduate student, graduate student of the Department of marine internal combustion engines, <sup>1</sup>Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovay str. 50a, Vladivostok, 690059, Russia, e-mail: nadezkin@msun.ru

**Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: kicha@msun.ru

**Gennadiy P. Kicha**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of marine internal combustion engines, <sup>1</sup>Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovay str. 50a, Vladivostok, 690059, Russia, e-mail: kicha@msun.ru

**Андрей Вениаминович Надежкин**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: nadezkin@msun.ru

**Andrey V. Nadezhkin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of marine internal combustion engines, <sup>1</sup>Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovay str. 50a, Vladivostok, 690059, Russia, e-mail: nadezkin@msun.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.08.2022.

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Научная статья

УДК 629.584

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.019>

### Разработка малогабаритного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата гибридной компоновки

И.М. Данцевич<sup>1</sup> dantsevich65@mail.ru

<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** Результатом научно-исследовательской работы является разработка малогабаритных телеуправляемых аппаратов гибридной компоновки. Телеуправляемый аппарат относится к типу гибридных, сочетающих свойства субмарины статического погружения и высокоманевренного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) «привязного типа».

Такое построение ТНПА потребовало совмещение анализа подводных мобильных объектов с обтекаемыми формами и дооснащения активно управляемым движительно-рулевым комплексом.

Высота хода телеуправляемого необитаемого аппарата регулируется заполнением балластной цистерны, в комбинации с управлением движителями, а также рулями высоты и направления.

Способ линеаризации известными методами (в статье применяется метод наименьших квадратов) позволяет получить практически линейные характеристики движителей, которые сведены в таблицу коэффициентов и по выбранным типам сигналов с джойстиков управления, подобрать удовлетворительные характеристики, комбинации усилий движителей по заданному типу движения.

Синтезированная система управления требует расчёта присоединённых масс воды, а также продувки моделей с целью определения коэффициентов сопротивления по изменениям углов атаки, скоростного крена и рыскания в уравнениях динамики.

Гибридная схема компоновки позволяет уменьшить количество типов переключения движителей, соответственно уменьшить объём трафика передаваемой телеметрии и команд управления аппаратом.

Автономность аппаратов можно обеспечить применением баржи носителя с резервными источниками питания, и модемом для радиотрансляции команд управления и видео с видеокamer аппарата.

**Ключевые слова:** баржа носитель, гибридная схема компоновки, гидродинамические коэффициенты управления, линеаризованные характеристики, математическая модель, телеуправляемый подводный аппарат, тип переключения движителей.

**Для цитирования:** Данцевич И.М. Совершенствование разработки малогабаритного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата гибридной компоновки, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 147—152.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.019>

### Improvement of a small-sized remotely operated hybrid configuration unmanned submarine vehicle development

Igor M. Dantsevich<sup>1</sup> dantsevich.aumsu@gmail.com,

<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** The result of scientific research is the development of a small-sized remotely operated hybrid configuration unmanned submarine device. The remote-controlled vehicle belongs to the hybrid type, combining the properties of a static immersion submarine and a highly maneuverable remotely operated underwater vehicle (ROUV).

The construction like ROUV is the result of combination of underwater streamlined shape mobile objects with retrofitting of actively controlled propulsion and steering complex.

The height of the remotely operated underwater vehicle is controlled by filling the ballast tank, in combination with the control of propellers, as well as the elevators and rudders.

The method of linearization by known methods (the least squares method is used in the article) makes it possible to obtain almost linear characteristics of propellers, which are summarized in a table of coefficients and according to selected types of signals from control joysticks, to select satisfactory characteristics, combinations of forces of propellers according to a given type of motion.

The synthesized control system requires the calculation of the connected masses of water, as well as the purging of models in order to determine the resistance coefficients based on changes in angles of attack, speed roll and yaw in the equations of dynamics.

The hybrid layout scheme allows you to reduce the number of types of mover switching, respectively, to reduce the volume of traffic of transmitted telemetry and machine control commands.

The autonomy of the devices can be ensured by using a medium barge with redundant power supplies, and a modem for broadcasting control commands and video from the video cameras of the device.

**Keywords:** attached water masses, barge carrier, hybrid layout diagram, hydrodynamic control coefficients, linearized characteristics, mathematical model, remotely operated underwater vehicle (ROUV), type of movers switching.

**For citation:** Igor M. Dantsevich, Improvement of a small-sized remotely operated hybrid configuration unmanned submarine vehicle development, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 147—152.

### Введение

Классическая компоновка телеуправляемых необитаемых аппаратов предусматривает плохообтекаемые формы, с преобладанием большей площади отсеков плавучести в продольно-поперечной плоскости по отношению к вертикально-продольной. При этом стремятся создать практически нулевую плавучесть аппаратов, за счёт использования блоков плавучести, а выбор рабочей глубины реализуется применением гаража-заглубителя с системами заборного оборудования (спуск-подъёмного, энергетики и др.).

Применение плохообтекаемых форм требует большего количества движителей [1-2], способных компенсировать создаваемыми силами и моментами статические характеристики.

Уменьшения числа движителей, а следовательно улучшение характеристик по параметрам потребляемой мощности можно решить выбором более лучшей с точки зрения гидродинамики конструкцией, с соответствующими параметрами двигательного-рулевого комплекса.

Использование малогабаритных ТНПА позволяют отказаться от использования судна носителя с необходимым комплектом оборудования. Мобильность малогабаритных ТНПА значительно выше и обычно не требуют специальных разрешений, как при использовании аппаратов рабочего класса, вместе с тем, многие задачи можно решать даже использованием малогабаритных аппаратов небольшой мощности.

Обычный подводный аппарат, оснащённый классическим движителем с одним или более винтами, расположенный в кормовой части при выполнении манёвров имеет значительную циркуляцию при выполнении поворотов, с невозможностью выполнения разворотов на месте.

Это приводит к потере захваченного видео в кадре, соответственно удержание в поле зрения места проведения работ оказывается невозможным.

Принципиально, балансировкой аппарата достигается практически нулевая плавучесть (небольшая положительная обеспечивается для всплытия в случае потери управления) [3].

Движение вперёд (назад) обеспечивается главным движителем, а разворот лобовой части аппарата, где размещена камера и система освещения требует наличия движителей способных развернуть аппарат во всех плоскостях [2].

### Математическая модель телеуправляемого аппарата

Создание системы управления на первом этапе требует создания математической модели телеуправляемого аппарата. Инерционные составляющие динамики носителя должны учитывать присоединённые массы воды с учётом, которых можно создать адаптивную систему управления, как показано на рис. 1.

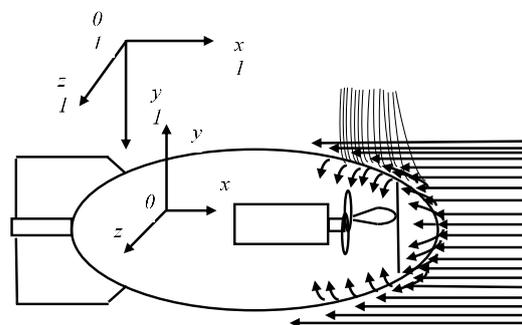


Рис. 1 – Гидродинамическая модель движения ТНПА

Расположение 3-х маршево-лаговых горизонтальных движителей (ГД), установленных на несущей раме ПА под углом порядка 90° к ДП, позволяет рассчитать вектор тяги в различных режимах движения, при этом маневрирование аппарата обеспечивается как рулевым так движительным управлением. Режим всплытия реализуется двумя парами рулей глубины.

Для записи и решения уравнения кинематики с учётом присоединённых масс воды рассмотрим пример из [2]

$$T = \frac{1}{2} \cdot [V_x \ V_y \ V_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z] \times \begin{pmatrix} m + \lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m + \lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{26} \\ 0 & 0 & m + \lambda_{33} & 0 & \lambda_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{xx} + \lambda_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{53} & 0 & J_{yy} + \lambda_{55} & 0 \\ 0 & \lambda_{62} & 0 & 0 & 0 & J_{zz} + \lambda_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

Тогда общее уравнение движения для тяги движения:

$$T = 0,5 \cdot (m_x V_x^2 + m_y V_y^2 + m_z V_z^2 + J_x \omega_x^2 + J_y \omega_y^2 + J_z \omega_z^2) + \lambda_{26} V_y \omega_z + \lambda_{35} V_z \omega_y \quad (2)$$

Из справочника [3], с учётом применимости свойства парности запишем значения присоединённых масс и моментов инерции:

$$\left. \begin{aligned} K_x &= m_x V_x; & K_y &= m_y V_y + \lambda_{26} \omega_z; & K_z &= m_z V_z + \lambda_{35} \omega_y; \\ L_x &= J_x \omega_x; & L_y &= J_y \omega_y + \lambda_{35} V_z; & L_z &= J_z \omega_z + \lambda_{26} V_y; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\vec{K} = [K_x \ K_y \ K_z]$  – главный вектор количества движения,  $\vec{L} = [L_x \ L_y \ L_z]$  – главный вектор момента количества движения относительно начала координатной системы.

При движении ТНПА будет поворачиваться вокруг начала координат с некоторой угловой скоростью  $\Omega$ .

Соответственно для  $\vec{R}$  – главного вектора внешних сил и  $\vec{M}$  – главного момента внешних сил

относительно начала координат, при движении с линейной скоростью  $V$ :

$$\frac{d\vec{K}}{dt} + \vec{\Omega} \cdot \vec{K} = \vec{R}, \quad (4)$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} + \vec{\Omega} \cdot \vec{L} + \vec{V} \cdot \vec{K} = \vec{M}. \quad (5)$$

Векторные уравнения (5) и (6) в проекциях на связанные оси:

$$\vec{K} = \vec{i}K_x + \vec{j}K_y + \vec{k}K_z, \quad (6)$$

$$\vec{L} = \vec{i}L_x + \vec{j}L_y + \vec{k}L_z, \quad (7)$$

$$\vec{R} = \vec{i}R_x + \vec{j}R_y + \vec{k}R_z, \quad (8)$$

$$\vec{M} = \vec{i}M_x + \vec{j}M_y + \vec{k}M_z. \quad (9)$$

Стабилизация движения, или маневрирование ТНПА с минимальными значениями угловой скорости описывается определителями вида [6]:

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{K} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ K_x & K_y & K_z \end{vmatrix} = \vec{i}(\omega_y K_z - \omega_z K_y) - \vec{j}(\omega_x K_z - \omega_z K_x) + \vec{k}(\omega_x K_y - \omega_y K_x), \quad (10)$$

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{L} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ L_x & L_y & L_z \end{vmatrix} = \vec{i}(\omega_y L_z - \omega_z L_y) - \vec{j}(\omega_x L_z - \omega_z L_x) + \vec{k}(\omega_x L_y - \omega_y L_x), \quad (11)$$

$$\vec{V} \cdot \vec{K} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ V_x & V_y & V_z \\ K_x & K_y & K_z \end{vmatrix} = \vec{i}(V_y K_z - V_z K_y) - \vec{j}(V_x K_z - V_z K_x) + \vec{k}(V_x K_y - V_y K_x). \quad (12)$$

Для аппарата, в котором получена хорошая балансировка, когда точка приложения центра масс совпадает с точкой приложения силы математическая модель движения ПА имеет вид:  $\omega_x = \dot{\theta}$ ,  $\omega_y = \dot{\varphi}$ ,  $\omega_z = \dot{\psi}$  и  $\sigma = (\varphi - \beta)$

$$\left. \begin{aligned} x_g &= V_{xg} = V, \\ y_g &= V_{yg} = V(\psi - \alpha), \\ z_g &= V_{zg} = -V(\varphi - \beta) = V_{\sigma}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

для реализации поперечного движения

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_y \\ \dot{\psi} \\ \dot{\psi}_y \\ \dot{\psi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\psi}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & a_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z_g \\ \psi \\ \psi_y \\ \psi \\ \psi_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_{31} \\ b_{41} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{62} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} D_B \\ D_{D_r} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где  $a_{12} \dots a_{66}$  – численные значения гидродинамических коэффициентов,  $b_{21} \dots b_{42}$  – коэффициенты пропорциональности при силах сопротивления,  $d_B$  – вектор перекладки рулей.

Продольное движение описывается системой уравнений вида [7]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\psi}_z \\ \dot{\varphi}_g \\ \dot{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{88} & 0 & a_{80} \\ a_{29} & 0 & 0 & a_{90} \\ 0 & a_{08} & 0 & a_{00} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \psi \\ \psi_z \\ y_g \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{83} & b_{84} \\ 0 & 0 \\ b_{03} & b_{04} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} D_r \\ (D - G) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где  $a_{00} \dots a_{90}$ , – гидродинамические коэффициенты,  $b_{03} \dots b_{04}$  – коэффициенты пропорциональности при силах сопротивления,  $\delta_r$  – суммарный вектор тяги движителей,  $(D - G)$  – вращение ТНПА в вертикальной плоскости,  $G$  – сила веса,  $D$  – сила водоизмещения.

Для движительно-рулевой схемы, приведенной на рисунке 4, актуально соотношение сил и упоров движителей [3]

$$\frac{2hT_{B,C}}{3} = \frac{2}{3}T_A, \quad (16)$$

где  $T_{B,C}$  – тяги движителей, размещённых в вершинах С и D,  $T_A$  – тяга движителя, размещённого в вершине А, как показано на рисунке 2,  $H$  – высота треугольника АСD.

Вычисленные значения гидродинамических параметров для аппарата с водоизмещением  $D = 7,95$  кг, шириной  $B = 200$  мм (0,2 м) высотой борта  $H = 200$  мм (0,2 м), коэффициентом общей полноты  $\delta = 0,785$  мм, коэффициентом полноты площади ватерлинии  $\alpha = 0,89$  мм, длины  $L = 700$  мм

$$\lambda_{33} = \frac{D}{g} = \frac{7,95}{9,81} = 0,81 \text{ кг}, \quad (17)$$

$$J_x = \frac{D}{g} \left( \frac{B^2 \alpha^2}{11,4\delta} + \frac{H^2}{12} \right) = 0,81 \cdot \left( \frac{0,2^2 \cdot 0,89^2}{11,4 \cdot 0,785} + \frac{0,2^2}{12} \right) = 0,0055 \text{ кг} \cdot \text{м},$$

$$\lambda_{44} = (0,25 \div 0,35)J_x = 0,3 \cdot 0,0055 = 0,00167 \text{ кг} \cdot \text{м}, \quad (18)$$

$$J_y = 0,07 \frac{\alpha}{g} DL = 0,07 \cdot \frac{0,89}{9,81} \cdot 7,95 \cdot 0,7^2 = 0,0799 \text{ кг} \cdot \text{м}, \quad \lambda_{55} = J_y, \quad (19)$$

Составим матрицу программного движения для трёх основных типов перемещения:

$$T = \begin{cases} \pm U_1, \text{ вперёд – назад,} \\ \pm U_2 \text{ повороты направо – налево,} \\ \pm U_3 \text{ движение вправо – влево.} \end{cases} \quad (20)$$

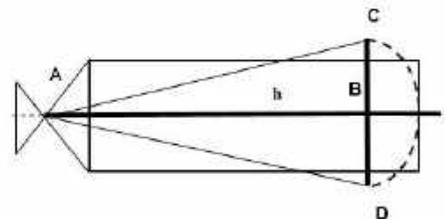


Рис.2 – Компонка движительно-рулевого комплекса ТНПА ( $H=700$  мм,  $B=210$  мм,  $B=170$  мм)

Определим силы упоров движителей при реализации выбираемого типа движения. При движении вперёд-назад все движители консолидировано, включены на работу вперёд или назад, как показано на рисунке 3.

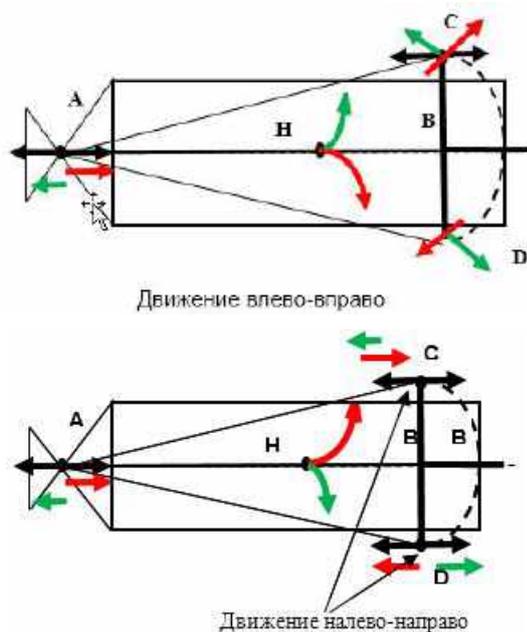


Рис.3 – Определение векторов движения по типу управления

Повороты направо-налево соответствуют переключению только движителей, расположенных в точках «С» и «D», рис. 3, «враздрай» при развороте «направо» движитель С создаёт упор в корму аппарата, движитель D создаёт упор вперёд, при

развороте «налево», включение движителей строго обратно.

Движение «вправо-влево» упор кормового движителя, расположенного в вершине «А» направлен назад, при этом руль направления переключается на направление движения, движители «С» и «D» работают противоположно как в случае реализации движения «направо-налево» [8-9].

Погружение - всплытие обеспечивается статической системой наполнения балластной цистерны внутри аппарата, и в случае всплытия или погружения во время движения дополнительный момент всплытия (или погружения) создают все три движителя перекладкой рулей высоты.

Калибровкой в бассейне определим значения упоров сил и моментов при реализации заданного типа движения «вправо-налево», как указано в таблице 1, затем с использованием программы «Движитель» рассчитаем значения сил и упоров на выбранный тип движения с присоединёнными массами воды и раскладками сигналов управления (1)-(19) [10].

Рассчитанные значения с линеаризованными характеристиками сведём в табл. 1 и построим в виде графиков сил и моментов, представленных на рис. 4.

Таблица 1

Значения сил, момента ТНПА от сигнала управления движение «вправо-налево»

Уупр [В]	Му [Нxm]	РА[Н]	РС[Н]	РD[Н]
-4	-4.0233	-0.94833	-0.47417	-0.47417
-3	-3.0175	-0.7112	-0.3556	-0.3556
-2	-2.0116	-0.47413	-0.23707	-0.23707
-1	-1.0058	-0.23707	-0.11853	-0.11853
0	0	0	0	0
1	1.4845	0.349867	0.174933	0.174933
2	2.9689	0.6998	0.3499	0.3499
3	4.4534	1.049667	0.524833	0.524833
4	5.9378	1.399533	0.699767	0.699767

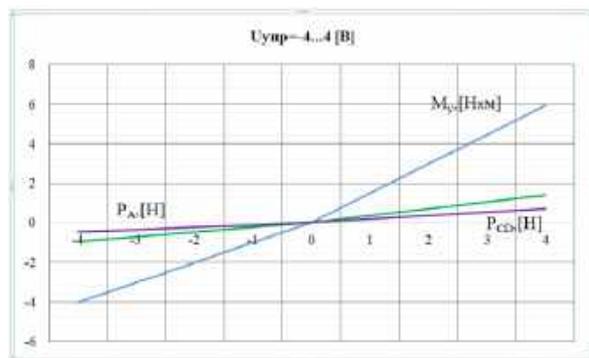


Рис. 4 – Механические характеристики двигателей при реализации типа движения «вправо-влево» (УЗ)

### Программное и аппаратное обеспечение телеуправляемой роботизированной подводной системой

Структурно телеуправляемый роботизированный подводный комплекс (рис. 5) состоит из надводной баржи-носителя с размещённым на ней надводным оборудованием и подводным аппаратом, связанным с баржей кабелем по которому передаются на подводный аппарат сигналы и команды управления, а на саму баржу-носитель транслируются сигналы видео с камеры подводного аппарата.

Баржа-носитель спроектирована так, чтобы центр тяжести находился ниже ватерлинии. Это достигается размещением в подводном боксе аккумуляторной литиевой-гелевой аккумуляторной батареи. Батарея служит источником энергии для маршевых двигателей, сонара и светильников.

На надводной части баржи-носителя имеется барабан с кабель-тросом, позволяющий отматывать и сматывать кабель-трос при маневрировании по глубине и направлению подводного аппарата. Барабан управляется электрическим приводом от электродвигателя постоянного тока через понижающий редуктор.

Антенна обеспечивает передачу и приём сигналов управления, вторая антенна отдельно транслирует видео с борта подводного аппарата. Предполагается также установка второй видеокамеры в подводном блоке баржи-носителя, для отображения видео над подводным аппаратом.

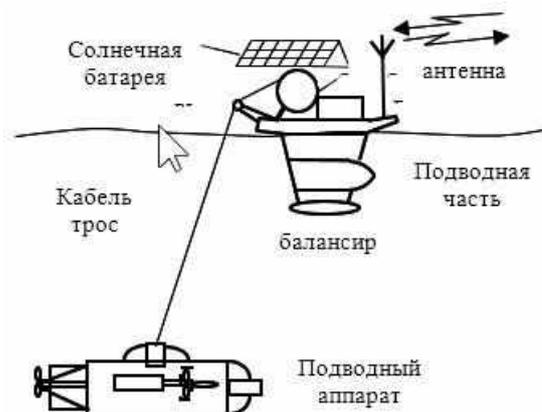


Рис. 5 – Роботизированный подводно-технический комплекс с малогабаритным телеуправляемым необитаемым аппаратом

Солнечные батареи предназначены для подзарядки аккумулятора баржи-носителя при выполнении работ не требующей маневрирования баржи-носителя. Отдельно допускается аварийное энергоснабжение подводного аппарата от аккумулятора баржи-носителя.

Весь комплекс работает автономно и использованием технологии управления через смартфон по Wi-Fi (платформа Андроид).

### Заключение

Полученные результаты позволили реализовать малогабаритный подводный аппарат. Управление движительно-рулевым комплексом выполнено с использованием характеристик двигателей на линеаризованных характеристиках.

Небольшие размеры аппарата позволяют откалибровать систему управления непосредственно в бассейне. Обычный способ линеаризации известными методами позволяет получить практически линейные характеристики двигателей, которые можно свести в таблицу коэффициентов и по выбранным типам сигналов с джойстиков управления подобрать удовлетворительные характеристики.

### Литература

1. Пшихопов В. Х. и др. Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 3 (152). – С. 87-101.
2. Данцевич И. М., Лютикова М. Н., Метревели Ю. Ю. Формализация задачи движения в продольно-поперечной плоскости телеуправляемых подводных аппаратов // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 4. – № 2. – С. 168-177.
3. Инзарцев А. В. и др. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. – 2018.
4. Лукомский Ю.А., Чугункин В.С. Системы управления морскими подвижными объектами: Учебник – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.
5. Костенко В. В., Мокеева И. Г. Исследование влияния кабеля связи на маневренность телеуправляемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – № 1. – С. 22-27.
6. Дудакова Д. С., Дудаков М. О., Анохин В. И. Опыт применения глубоководного телеуправляемого аппарата для изучения подводных ландшафтов Ладожского озера // Российский журнал прикладной экологии. – 2018. – № 4 (16). – С. 51-55.
7. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю. Подход к разработке информационно-управляющей системы для телеуправляемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. – 2017. – № 1. – С. 44-49.

8. Гой В. А. и др. Опыт разработки и испытаний телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с автономным источником питания //Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2015. – Т. 6. – С. 101-106.
9. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973. – 216 с.
10. Киселев Л. В., Костенко В. В., Медведев А. В. Особенности динамической модели пространственного движения гибридного необитаемого подводного аппарата //Подводные исследования и робототехника. – 2021. – №. 1. – С. 18-30.

#### References

1. Pshikhopov V. Kh. And others. Development of an intelligent control system for an autonomous underwater vehicle//News of the Southern Federal University. Technical sciences. – 2014. – №. 3 (152). - S. 87-101.
2. Dantsevich I. M., Lyutikova M. N., Metreveli Yu. Yu. Formalization of the task of movement in the longitudinal-transverse plane of tele-controlled underwater vehicles//Marine intelligent technologies. – 2021. – Т. 4. – №. 2. - S. 168-177.
3. Inzartsev A.V. and others. Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications. – 2018.
4. Lukomsky Yu.A., Chugunkin V.S. Marine mobile control systems: Textbook - L.: Shipbuilding, 1988. – 272 pages.
5. Kostenko V.V., Mokeeva I.G. Study of the influence of a communication cable on the maneuverability of a tele-controlled underwater vehicle//Underwater research and robotics. – 2009. – №. 1. - S. 22-27.
6. Dudakova D. S., Dudakov M. O., Anokhin V. I. Experience of using a deep-sea tele-controlled apparatus to study underwater landscapes of Lake Ladoga//Russian Journal of Applied Ecology. – 2018. – №. 4 (16). - S. 51-55.
7. Filarets V.F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. Approach to the development of an information and control system for tele-controlled underwater vehicles//Underwater research and robotics. – 2017. – №. 1. - S. 44-49.
8. Goi V. A. and others. Experience in the development and testing of a remote-controlled uninhabited underwater vehicle with an autonomous power supply//Technical problems of the development of the world's oceans. – 2015. – Т. 6. - S. 101-106.
9. Antov E.N., Makhin N.N., Sheremetov B.B. Fundamentals of the theory of the movement of underwater vehicles. - L.: Shipbuilding, 1973. – 216 pages.
10. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. Features of a dynamic model of spatial motion of a hybrid uninhabited underwater vehicle//Underwater research and robotics. – 2021. – №. 1. - S. 18-30.

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

**Игорь Михайлович Данцевич**, кандидат технических наук, Исполнительный директор НИИ ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

**Igor M. Dantsevich**, Ph.D. (Eng), Executive Director of the Scientific Research Institute, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 22.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.06.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.06.2022.

Научная статья

УДК:629.584

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.020>

## Совершенствование управлением многоцелевым буксируемым комплексом с применением нейросетевого контроллера в асимптотике полиномов Бернштейна

М.Н. Лютикова<sup>1</sup> [mnlyutikova@mail.ru](mailto:mnlyutikova@mail.ru)

<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** В статье рассматривается метод построения нейросетевого контроллера для управления движением забортного геофизического комплекса (общее название носитель нейтральной плавучести). Оборудование такого типа относится к подводным буксируемым системам за геофизическим судном.

Подводный аппарат (носитель нейтральной плавучести) оснащается комплексом сканирования донной поверхности, пробоотборниками и другими приборами, и инструментами.

С целью достижения статической устойчивости носитель нейтральной плавучести выполняют с плохообтекаемыми формами с большей по отношению к другим размерениям горизонтальной плоскостью, чем достигается совместно с центровкой строгое параллельное дну расположение носителя нейтральной плавучести.

При подводной буксировке за счёт лобового сопротивления, а также вязкого трения жидкости подводный аппарат требует дополнительного воздействия вертикальных приводов группы движителей, размещённых в плане прямоугольной платформы блока носителя нейтральной плавучести, с целью стабилизации в выбранном направлении.

Обычно, требуется удержание подводного аппарата с некоторым деферентом в корму, чтобы гидролокатор сканирующего сонара имел наклонную диаграмму направленности антенны. Из опыта подводной съемки этим достигается более качественная сонограмма.

Обработка приводами вертикального перемещения требуется при обнаружении местных предметов и препятствий в виде объектов с остаточной отрицательной плавучестью.

При управлении буксируемым комплексом используется навигационный комплекс судна-буксировщика. Задача буксирующего судна удерживаться на линии заданного профиля движения технологической программы исследования.

Целью текущего исследования является – совершенствование управления группой движителей вертикального перемещения носителя нейтральной плавучести геофизического забортного комплекса (ГЗК) за счёт технологии нейросетевого контроллера управления. При этом масштабирование массива обучения добавление фиктивных, (аппроксимированных) точек обучения контроллера выполняется в асимптотике полиномов Бернштейна.

**Ключевые слова:** глубоководный забортный комплекс (ГЗК), геофизический забортный комплекс, вертикальное подруливающее устройство (ВПУ), многоуровневый пропорциональный регулятор (МПР), носитель нулевой плавучести (ННП), нейроконтроллер, среднеквадратическое отклонение (СКО).

**Для цитирования:** Лютикова М. Н. Совершенствование управлением многоцелевым буксируемым комплексом с применением нейросетевого контроллера в асимптотике полиномов Бернштейна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 153—159.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.020>

## Improved management a multipurpose towed complex with the formation of neural network controller in the asymptotic of Bernstein polynomials

Marina N. Lyutikova<sup>1</sup> [mnlyutikova@mail.ru](mailto:mnlyutikova@mail.ru)

<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** In the paper considers the method of constructing a neural network controller for controlling the movement of the outboard geophysical complex (the general name is the carrier of neutral buoyancy). Equipment of this type relates to underwater towed systems behind a geophysical vessel.

The underwater vehicle (neutral buoyancy carrier) is equipped with a bottom surface scanning complex, samplers and other instruments, and tools.

In order to achieve static stability, the carrier of neutral buoyancy is made with poorly streamlined shapes with a horizontal plane larger than other dimensions than a strict parallel location of the carrier of neutral buoyancy is achieved together with alignment.

During underwater towing due to drag, as well as viscous fluid friction, the underwater vehicle requires additional action by vertical drives of a group of propellers located in the plan of the rectangular platform of the neutral buoyancy carrier unit in order to stabilize in the selected direction.

In general, it is required to retain the underwater vehicle with some of the dopant aft so that the sonar of the scanning sonar has an inclined antenna pattern. From the experience of underwater catching, this achieves a better sonogram. Testing by vertical movement drives is required when local objects and obstacles are detected in the form of objects with residual negative buoyancy.

When controlling the towed complex, the navigation complex of the towing vessel is used. The task of the towing vessel is to be kept on the line of the specified traffic profile of the technological study program.

The purpose of the current study is to improve the control of a group of propellers for vertical movement of the neutral buoyancy carrier of the geophysical outboard complex (GZK) due to the technology of the neural network control controller. In this case, the scaling of the training array (addition of dummy training points) of the controller is carried out in the asymptotics of Bernstein polynomials.

**Keywords:** deep sea complex (GZK), geophysical outboard complex (GPC), vertical thruster (VT), multilevel proportional regulator (MPR), zero buoyancy carrier, neurocontroller, mean square deviation.

**For citation:** Marina N. Lyutikova Improved management a multipurpose towed complex with the formation of neural network controller in the asymptotic of Bernstein polynomials Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 153—159.

### Введение

Система управления забортным геофизическим комплексом характеризуется адаптивным управлением приводами перемещения буксируемой системы. Задача управления судна-буксировщика сведётся к определению входных параметров движения, в нашем случае это отсчёты координат широты и долготы, для центра масс вращения судна. Учитывая применение забортного оборудования в составе комплекса, отдельно в технологической схеме, параметрами входа для позиционирования забортного комплекса также являются отсчёты широты и долготы, определяемые с борта судна-буксировщика.

Анализ литературы показывает, что можно выделить следующие виды автоматического управления геофизическими системами:

- стабилизация параметров движения (стабилизация курса, скорости, глубины и т. д.);

- адаптивное управление – это управление с автоматической настройкой регуляторов или систем управления компенсаторов качки, вызванной волнением моря, компенсации дрейфа подводной буксируемой системы, при реализации полуавтоматического движения (управление с джойстиком) вдоль линии заданного профиля исследования шельфа [1];

- программное управление - автоматическое движение по программной заданной подводной траектории линии заданного профиля исследования шельфа и т.д.[2];

- интеллектуальное управление, основанное на построении интеллектуальных информационных систем (логических, логико-вероятностных и нечетких базах знаний) для моделирования неизвестных препятствий на основе локальной сенсорной информации от ИС или от моделей виртуальной реальности, для моделирования коротких траекторий движения геофизической системы в среде с известными или неизвестными препятствиями и т.п.

Применение ПД- и ПИД-регуляторов имеют существенные недостатки, особенно сложность их настройки.

В нашей работе рассматривается адаптивное управление с использованием нейронного

контроллера управления буксируемого аппарата геофизической системы при исследовании шельфа.

Адаптивная система управления, приведенная на рисунке 1, имеет пять входов и один выход. Формирование сигнала ошибки  $\varepsilon_k$  происходит с использованием выходного сигнала  $y_k$  с вычитанием опорного сигнала

$$\varepsilon_k = d_k - y_k \tag{1}$$

где  $d_k$  – полезный, или опорный сигнал позиционирования,  $y_k = X_k^T W_k$  – выходной сигнал определения текущих координат, при этом  $X_k^T$  – отсчёты текущих координат,  $W_k$  – матрица вектора входных координат.

Или

$$\varepsilon_k = d_k - X_k^T W = d_k - W^T X_k, \tag{2}$$

Учитывая стационарный характер гидродинамической задачи движения судна:

$$R = E[X_k X_k^T] = E \begin{bmatrix} x_{0k}^2 & x_{0k}x_{1k} & x_{0k}x_{2k} & \dots & x_{0k}x_{Lk} \\ x_{1k}x_{0k} & x_{1k}^2 & x_{1k}x_{2k} & \dots & x_{1k}x_{Lk} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{Lk}x_{0k} & x_{Lk}x_{1k} & x_{Lk}x_{2k} & \dots & x_{Lk}^2 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где  $R$  – квадратная матрица функции среднеквадратического отклонения (СКО), координат.

Мгновенное квадратичное значение сигнала ошибки:

$$\varepsilon^2_k = d^2_k + W^T X_k X_k^T W - 2d_k X_k^T W, \tag{4}$$

тогда СКО сигнала ошибки:

$$\xi = E[\varepsilon_k^2] = E[d_k^2] + W^T R W - 2P^T W, \tag{5}$$

Элементы, расположенные на главной диагонали формулы (3), равны среднеквадратичным значениям входных сигналов, а остальные элементы – значениям взаимокорреляционной функции входных сигналов. Таким образом,  $P$  - вектор-столбец [1].

Двумерная функция СКО может представляться квадратичной поверхностью, графиком двумерной квадратичной рабочей функции. Сечения поверхности будет определять набор коэффициентов системы, обеспечивающих приближение случайной функции к набору критериев качества управления, точности привязки к текущим координатам [2].

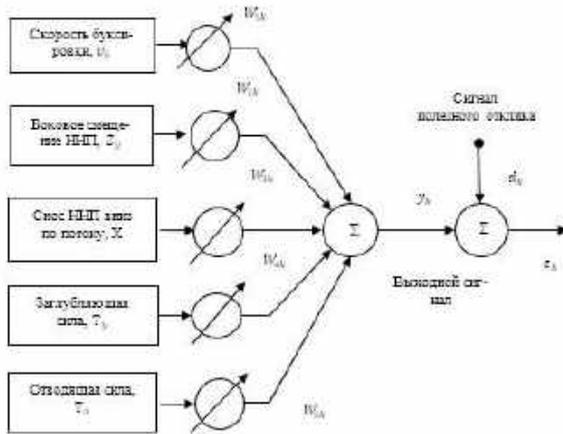


Рис. 1. Сигналы полезного отклика и ошибки в нейронной сети с пятью входами,  $d_k$  - сигнал полезного отклика;  $y_k$  - выходной сигнал;  $\epsilon_k$  - сигнал ошибки;  $W_{1k}, W_{2k}, W_{3k}, W_{4k}, W_{5k}$  - корректирующие элементы множеств [1]

Наиболее оптимальными методами адаптации рабочей функции преобразования координат и последующем вычислении собственного вектора системы являются методы наискорейшего спуска, метод Ньютона и др. Хорошие результаты даёт метод обучающих кривых, к вышеперечисленным методам поиска градиента рабочей функции.

Очевидно, что поиск градиента рабочей функции (5), во многого решается задачей оптимальной фильтрации данных в адаптивном рекурсивном фильтре системы [3].

Адаптивные системы автоматического управления движением ГЗК эффективны, однако, они требуют использования сложных математических моделей динамики пространственного движения ГЗК в условиях внешних возмущений, существенно усложняет техническую реализацию таких систем.

В большинстве прикладных задач исследуется динамика реальных объектов или их прототипов. Если возникает необходимость синтеза системы управления перспективной техники, то применяются методы моделирования на моделях с применением методов подобия для реальных объектов.

### Натурные измерения и обработка результатов

Рассматривая расширение круга решаемых задач применением буксируемой системы – гараж-заглубитель и подводный аппарат, оснащённый комплексом батиметрической аппаратуры, как показано на рисунке 2, рассмотрим модель буксируемой системы «Судно – Подводный Необитаемый Аппарат» (С-ПНА).

При использовании гидроакустических станций геофизических исследований необходимо обеспечить движение судно-носителя вдоль линии заданного профиля, добившись при этом параметров стабилизации:

- путевого угла в пределах  $\pm 1^0$ ;
- бокового сноса  $\pm 1,5^0$ .

В противном случае полученные данные будут сильно зашумлены рысканиями антенн гидролокатора относительно линии движения, желательно также выдерживать определенный угол

атаки движения аппарата, так обеспечивается «перспективная» проекция съёмки.

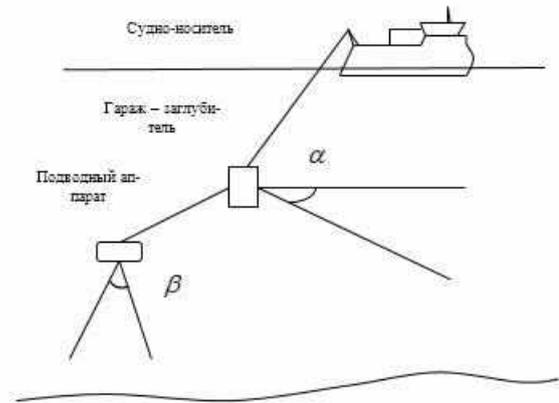


Рис. 2. Применение буксируемой системы гараж-заглубитель – подводный аппарат [4]

Если рассматривать совместно с динамикой судна и динамику буксируемого объекта с управлением с борта судна, путём изменения длины буксирного троса, то динамика системы С-ПНА будет описываться уже тремя системами координат:

- неподвижная декартова система координат  $O_g X_g Y_g Z_g$ ;
- система координат, описывающая поток жидкости, в том числе присоединённый к корпусу судна  $O'_g X'_g Y'_g Z'_g$ .

Система уравнений, описывающая динамику движения системы С-ПНА [5]:

$$\begin{cases} m(1+k_{11})\dot{v}\cos\beta - m(1+k_{11})\dot{v}\beta\sin\beta + m(1+k_{22})\dot{v}\omega\sin\beta = T_E - X_K - X_P - T_X, \\ -m(1+k_{22})\dot{v}\sin\beta - m(1+k_{22})\dot{v}\beta\cos\beta + m(1+k_{11})\dot{v}\omega\cos\beta = Y_K + Y_B - Y_P - Y_A + T_Y, \\ J_z(1+k_{66})\omega - m(k_{22}-k_{11})\dot{v}^2\sin\beta\cos\beta = M_K + M_P - M_B - M_T - M_A. \end{cases} \quad (6)$$

где  $(X_g, Y_g)$  – координаты центра тяжести судна в неподвижной системе координат;  $\dot{v}$  – скорость центра тяжести судна;  $\omega$  – угловая скорость вращения судна;  $\beta, \varphi, \gamma$  – углы дрейфа, курса и скорости;  $k_{11}, k_{22}, k_{66}$  – коэффициенты присоединённых масс вдоль продольной, поперёчной осей судна и присоединённый момент инерции;  $m$  – масса судна;  $J_z$  – момент инерции судна относительно вертикальной оси;  $X_K, Y_K, M_K$  – продольная и поперёчная сила на руле и момент, создаваемый поперёчной силой руля относительно центра тяжести судна;  $Y_A, M_A$  – поперёчная аэродинамическая сила и момент создаваемый центром масс судна;  $Y_B, M_B$  – поперёчная сила от гребного винта и момент, создаваемый относительно центра масс судна;  $T_E$  – полезная тяга винта;  $T_X, T_Y$  – проекции горизонтальной силы на оси  $X, Y$ ;  $M_T$  – момент от силы  $T_X$ .

Натурные измерения с носителем нейтральной плавучести выполнены в рамках государственного НИОКР при обработке перспективной геофизической

системы для судна носителя ПАО «Совкомфлот-Новошип» г/с «Вячеслав Тихонов».

Движение вдоль линии заданного профиля, как показано на рисунке 2.

Буксируемый аппарат, с параметрами:

- размеры – 2400 x 3600 x 2000 мм;
- масса – примерно 4000 кг;
- отрицательная плавучесть – от 0 до 40 кН.

Ниже, в графическом виде, представлены некоторые результаты, полученные при расчете статических форм буксирных линий, связывающих ГЗ с судном-носителем (СН). Графический способ представления результатов позволяет наглядно представить форму буксирной линии, а также проследить влияние на форму различных факторов, например, влияние параметров кабель-троса, скорости буксировки, веса ГЗ и т. д.

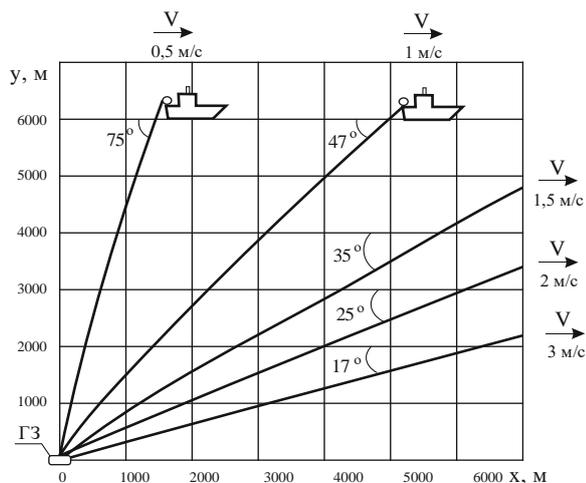


Рис. 3. Формы буксирных линий СН - ГЗ для различных скоростей буксировки

Формы буксирных линий СН - ГЗ показаны на рисунке 3, для скоростей буксировки: 0,5 м/с; 1,0 м/с; 1,5 м/с, 2 м/с, 3 м/с. ГЗ имеет вес в воде около 15000 Н. По оси ординат отложена глубина хода ГЗ в метрах, по оси абсцисс – отставание ГЗ от СН, в метрах.

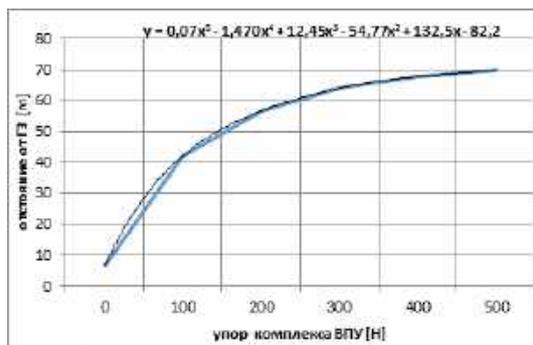
Анализ кривых, приведенных на рисунке 3, показывает, что на большей части длины КТ вытянут по прямой линии (особенно при скорости большей 0,5 м/с), расположенной под критическим углом буксировки (углы от 75 до 17 градусов при скоростях от 0,5 до 3 м/с).

Напомним, что критическим называется угол, под которым вытягивается КТ при его буксировке без груза на ходовом (нижнем) конце. Такая форма буксирной линии позволяет заключить, что длина КТ, необходимая для достижения заданной глубины при заданной скорости, определяется, в основном, параметрами КТ (погонный вес и диаметр), а вес ГЗ влияет на нее слабо.

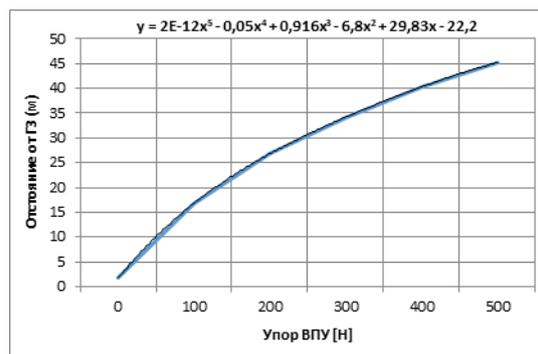
В сильной степени длина буксирной линии зависит от скорости буксировки. Например, из приведенных графиков видно, что на скорости 0,5 м/с для достижения ГЗ глубины 6000 м требуется выпустить около 6400 м КТ. При скорости 1 м/с уже потребуется вытравить около 8000 м, а при скоростях более 2 м/с глубина 6000 м будет вообще не достижима при длине КТ 10000 м.

Проведенный анализ свидетельствует в пользу применения табличного управления, основная проблема при использовании расчетных формул непосредственно – это высокая степень полинома. При более низких степенях получить удовлетворительные характеристики аппроксимации не представилось возможным.

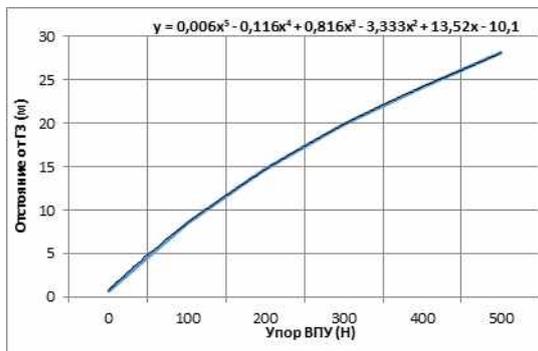
Рассчитаем методом аппроксимации Лагранжа уравнения кривых упора в зависимости от скорости буксировки и отстоянии ННП от ГЗ, как показано на рисунках 4 и 5.



4 а) определение силы упора двигателей ННП, длина КТ – 75 метров, скорость буксировки 0,5 м/с



4 б) Аппроксимация характеристики ВПУ и расчётный полином таблиц пропорционального регулятора, длина КТ – 75 метров, скорость буксировки 1 м/с



4 в) аппроксимация характеристики ВПУ и расчётный полином таблиц пропорционального регулятора, длина КТ– 75 метров, скорость буксировки 1,5 м/с

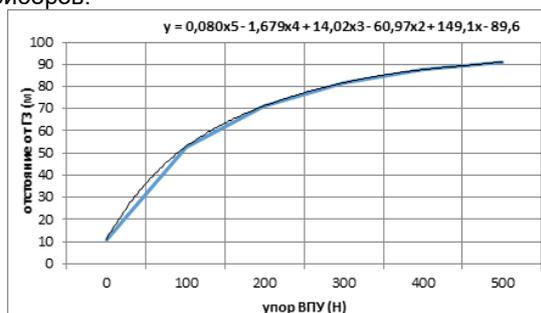
Рис. 4. Определение характеристик упоров ВПУ при длине кабель троса ГЗ-75 метров

УМБК должна обладать свойствами маневрирования и обеспечивать:

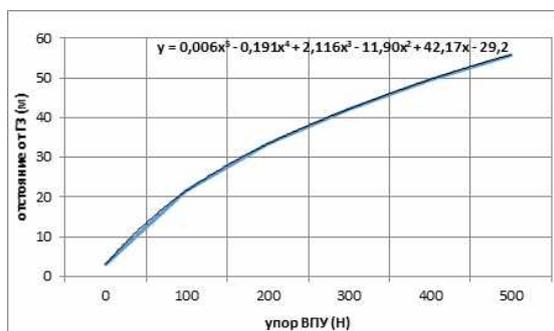
– обход препятствий во взаимодействии с буксирной лебедкой;  
 – стабилизацию движения модуля при ровном грунте (во взаимодействии с буксирной лебедкой).

В рабочем режиме работы подводная часть (ПЧ) УМБК представляет собой двухзвенную систему. Тяжелый гараж-заглубитель (ГЗ) прикреплен к буксирному КТ и в свою очередь буксирует за собой на кабеле связи (КС) (вытравленной длиной от 50 до 100 м) ННП. Таким образом, свойства маневрирования необходимо придать системе ГЗ-ННП.

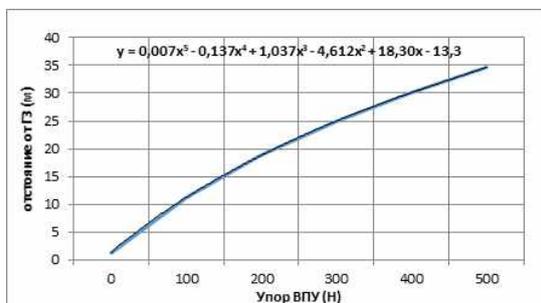
Контроль положения ГЗ в толще воды и относительно дна осуществляется по показаниям датчика давления и эхолота с точностью, заданной техническими характеристиками используемых приборов.



5 а) аппроксимация характеристики ВПУ и расчётный полином таблиц пропорционального регулятора, длина КТ – 100 метров, скорость буксировки 0,5 м/с



5 б) аппроксимация характеристики ВПУ и расчётный полином таблиц пропорционального регулятора, длина КТ – 100 метров, скорость буксировки 1 м/с



5 в) аппроксимация характеристики ВПУ и расчётный полином таблиц пропорционального регулятора, длина КТ – 100 метров, скорость буксировки 1,5 м/с

Рис. 5. Определение характеристик упоров ВПУ при длине кабель троса ГЗ-100 метров

Управление глубиной хода ПЧ УМБК возможно только изменением длины КТ за счет работы судовой лебедки СПУ или за счет изменения скорости движения судна. Эти способы являются основными, хотя не позволяют достаточно оперативно менять глубину буксировки ПЧ УМБК.

Проведем расчет зависимости скорости буксировки и глубины погружения связки ГЗ-ННП.

### Построение модели управляемого процесса и установка параметров контроллера.

Полученные наборы данных при натурных измерениях соответствуют нелинейным функциям распределения, при этом, учитывая пять параметров управления комбинация управляющих сигналов может достигать величины 120 (5!).

Скажем, что синтезируемый на каждом шаге расчётов нейрон формируется по наборам данных наблюдений.

Входными параметрами являются:

- скорость буксировки  $v_6$ ;
- боковое смещение ННП  $z_g$ ;
- снос ННП вниз по потоку,  $X$ ;
- заглубляющая сила,  $T_y$ ;
- отводящая сила,  $T_z$ .

Полученные отсчёты влияющих величин компенсируются упором, создаваемым вертикальным подруливающим устройством ННП, состоящего из трёх движителей размещенных в плане платформы плавучести, в передней части два и в корме – один.

Пять входных зависимостей:  $v_6(t)$ ,  $z_g(t)$ ,  $X(t)$ ,  $T_y(t)$ ,  $T_z(t)$ , за счёт проекции на буксируемую линию связаны с перемещением аппарата в вертикальной плоскости.

Нелинейный характер данных на каждом шаге вычислений выполним приближением в асимптотике полиномов Бернштейна, по пяти исходным точкам данных [6-7]

$$P_n(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n} J_{n,i}(t) \quad (7)$$

где

$$J_{n,i}(t) = \binom{n}{i} \cdot t^i \cdot (1-t)^{n-i} \quad (8)$$

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (9)$$

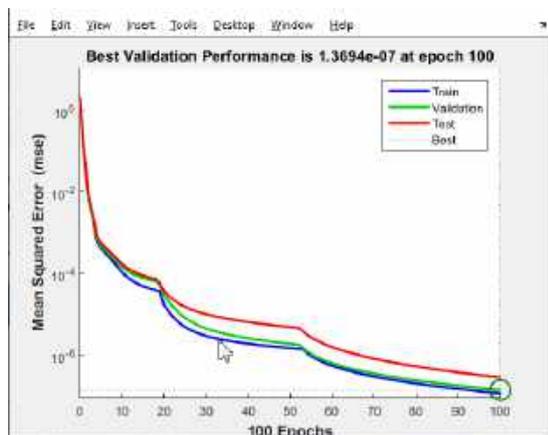
Исходные пять точек обучающей выборки позволяет на каждой итерации удваивать число обучающего массива, поступающие следующие отсчёты смещают массив вправо, при этом самая первая точка построения полинома Бернштейна удаляется. Генерируется новая обучающая кривая контроллера управления с записью следующего отсчёта, процесс повторяется.

Учитывая, область построения полинома Бернштейна, параметр  $t$  нормируется к задаваемому параметру – глубине хода, расстояние от ГЗ, деферент в корму и т.д. Т.е. область построения обучающей кривой нормируется к единице.

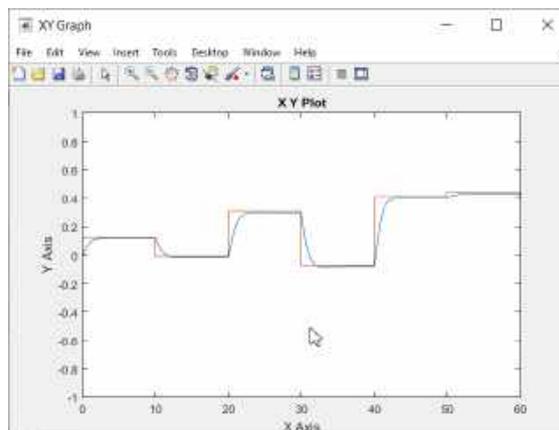
Выполним идентификацию управляемого процесса по наборам параметров приведенных на рисунках 4-5, т.е. построим нейросетевую модель системы управления, показанную на рисунке 6. Процедура идентификации позволяет построить нейронную сеть, которая будет моделировать динамику процесса управления ВПУ. По завершении генерации обучающей последовательности (рисунок 6 а) получаем сгенерированные данные.

Наборы отсчетов, поступающие на вход адаптивной системы обработки, формируются по фиксированной временем выборке. Необходимо сформировать выходной сигнал управления

вертикальным подруливающим устройством позволяющий удерживать ННП на требуемой глубине хода за буксирующим судном.



а)



б)

Рис. 6. Формирование контроллера управления: а) процесс обучения нейронной сети; б) система адаптивного управления

Уточнение модели формирования нейрона происходит по следующему правилу:

- запись в память первых точек аппроксимации;
- вычисление значения сигнала управления;
- запись следующих точек аппроксимации с фиксированной выборкой t;
- удаление из памяти предыдущих наборов;
- последовательно итерации повторяются;
- формируемые наборы соответствуют диаграмме, показанной на рисунке 6 б.

### Заключение

Управляющий сигнал на вертикальное подруливающее устройство соответствует широтно-модулируемому типу управления.

Из анализа полученных данных следует, что реакция системы на ступенчатые воздействия со случайной амплитудой носит монотонный характер, ошибка управления около 6%. Это свидетельствует о хорошем качестве регулятора для управления группой двигателей.

Таким образом, регулятор с предсказанием, реализованный в виде нейронной сети, можно использовать для управления группой двигателей вертикального перемещения носителя нейтральной плавучести геофизического заборного комплекса ГЗК. Аппроксимация точек обучения между узловыми, полученными в ходе калибровки системы, выполняется в асимптотике полиномов Бернштейна.

### Литература

1. Уидроу Б., Стирнз С. Д. Адаптивная обработка сигналов. – Радио и связь, 1989.
2. Римский-Корсаков Н. А., Лискин В. А., Зарецкий А. В. АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУКСИРУЕМЫХ АППАРАТОВ //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – №. 7. – С. 37-43.
3. Масютина Г. В., Лубенцов В. Ф. Структурно-параметрический синтез адаптивной системы управления на основе нечеткой логики //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. – Т. 106. – №. 5. – С. 165-170.
4. Данцевич И. М., Лютикова М. Н. Результаты исследования управления системой «судно-заборное оборудование» в продольно-вертикальной плоскости //Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – №. 3. – С. 76-81.
5. Хекерт Е. В., Данцевич И. М., Лютикова М. Н., Халеева Е. П. Технология управления геофизическим судном для изучения Мирового океана //Серия конференций IOP: Наука о Земле и окружающей среде. – IOP Publishing, 2021. – Т. 872. – №. 1. – С. 012001.
6. Новиков И. Я. Асимптотика корней полиномов Бернштейна, используемых в построении модифицированных всплесков Добеши //Математические заметки. – 2002. – Т. 71. – №. 2. – С. 239-253.
7. Тихонов И. В., Шерстюков В. Б., Петросова М. А. Полиномы Бернштейна: старое и новое //Математический форум (Итоги науки. Юг России). – 2014. – Т. 8. – №. 1. – С. 126-175.
8. Бардачевский Н. Н., Безсуднов Е. Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 5. – №. 2. – С. 124-128.
9. Потемкин В. Г., Медведев В. С. Нейронные сети. MATLAB 6. – 2002.
10. Гвоздева В. А. Интеллектуальные технологии в беспилотных системах. – 2021.

### References

1. Widrow B., Stirns S. D. Adaptive signal processing. - Radio and Communications, 1989.
2. Rimsky-Korsakov N. A., Liskin V. A., Zaretsky A. V. ASPECTS OF TECHNOLOGY FOR OCEANOLOGICAL RESEARCH USING TOWED VEHICLES//International Journal of Applied and Basic Research. – 2018. – №. 7. - S. 37-43.
3. Masyutina G.V., Lubentsov V.F. Structural and parametric synthesis of an adaptive control system based on fuzzy logic//Izvestia of the Southern Federal University. Technical sciences. – 2010. - Т. 106. – №. 5. - S. 165-170.
4. Dantsevich I. M., Lyutikova M. N. The results of the study of the control of the ship-outboard equipment system in the longitudinal-vertical plane//Operation of sea transport. – 2021. – №. 3. - S. 76-81.
5. Khekert E.V., Dantsevich I.M., Lyutikova M.N., Khaleeva E.P. Geophysical vessel management technology for the study of the world's oceans//IOP Conference Series: Earth and Environment Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 872. – №. 1. – Page 012001.
6. Novikov I. Ya. Asymptotic of the roots of Bernstein polynomials used in the construction of modified Dobeshi bursts//Mathematical notes. – 2002. - Т. 71. – №. 2. - S. 239-253.
7. Tikhonov I.V., Sherstyukov V.B., Petrosov M.A. Bernstein polynomials: old and new//Mathematical Forum (Results of Science. South of Russia). – 2014. - Т. 8. – №. 1. - s. 126-175.
8. Bardachevsky N. N., Bezsudnov E. Yu. State and prospects for the use of uninhabited underwater vehicles in the field of hydrographic research and underwater navigation//Interexpo Geo-Siberia. – 2013. - Т. 5. – №. 2. - S. 124-128.
9. Potemkin V. G., Medvedev V. S. Neural networks. MATLAB 6. – 2002.
10. Gvozdeva V. A. Intelligent technologies in unmanned systems. – 2021.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Марина Николаевна Лютикова**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационные технологии», ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

**Marina N. Lyutikova**, Ph.D. (Eng), Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 23.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 02.08.2022.

Научная статья

УДК 64-52

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.021>

## Разработка новой технологии мониторинга и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на морской поверхности с использованием беспилотных воздушных судов (БВС)

О.А. Букин<sup>1</sup> o\_bukin@mail.ru, Д.А. Коровецкий<sup>1</sup> 318704@mail.ru, А.А. Чехленок<sup>1</sup> 79242427448@ya.ru, Д.Ю. Проценко<sup>1</sup> dima.prsk@mail.ru, В.Ф. Юрчик<sup>1</sup> vita\_yurchik@mail.ru, А.М. Кривотулов<sup>1</sup> ghhf-2011@mail.ru, Е.А. Пяк<sup>1</sup> helen-devil@mail.ru.

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

**Аннотация.** В статье приводятся результаты разработки метода мониторинга и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов (ЛАРН) на морской поверхности с использованием БВС. В основе предлагаемого метода мониторинга используются аппаратно-программные комплексы (АПК), основанные на элементах искусственного интеллекта (ИИ) детектирования, сегментации плёнки нефтепродуктов и лазерно-индуцированной флуоресценции для определения их типов. В качестве носителей АПК разрабатывался БВС с возможностью посадки на поверхность воды и движущееся объекты, для надежной эксплуатации в условиях базирования на судах и дрейфующих платформах. Для ликвидации разливов нефтепродуктов предлагается использование распыления диспергентов с борта автономного БВС, при этом наличие элементов ИИ позволяет точно дозировать диспергент в зависимости от толщины слоя нефтепродукта. Отдельные элементы разрабатываемых средств и методов были апробированы как в ходе лабораторных испытаний, так и в ходе системного мониторинга акваторий портов, и показали высокую эффективность.

**Ключевые слова:** ликвидация аварийных разливов нефти, беспилотное воздушное судно, искусственный интеллект, сегментация, детектирование, распыление диспергентов, лазерная спектроскопия.

**Для цитирования:** Букин О.А., Коровецкий Д.А., Чехленок А.А., Проценко Д.Ю., Юрчик В.Ф., Кривотулов А.М., Пяк Е.А. Разработка новой технологии мониторинга и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на морской поверхности с использованием беспилотных воздушных судов (БВС) 2022. № 3 часть 1, С. 160—169.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.021>

## Development of a new technology for monitoring and elimination of emergency oil spills on the sea surface using unmanned aerial vehicles (UAVs)

Oleg A. Bukin<sup>1</sup> o\_bukin@mail.ru, Denis A. Korovetskiy<sup>1</sup> 318704@mail.ru, Alexey A. Chekhlenok<sup>1</sup> 79242427448@ya.ru, Dmitry Y Proshchenko<sup>1</sup> dima.prsk@mail.ru, Viktoriia F. Iurchik<sup>1</sup> vita\_yurchik@mail.ru, Andrey M. Krivotulov<sup>1</sup> ghhf-2011@mail.ru, Elena A. Pyak<sup>1</sup> helen-devil@mail.ru

<sup>1</sup> Maritime State University named after adm. G. I. Nevelskoy.

**Abstract.** The article presents the results of the development of a method for monitoring and elimination of emergency oil spills on the sea surface by UAV. The proposed monitoring method is based on hardware and software frameworks (HSFW) including elements of artificial intelligence (AI) for detection, segmentation oil films and laser-induced fluorescence to identify their types. The UAV was developed as carriers of the HSFW with the application of landing on water and onboard of the moving vessel. It is proposed to use dispersant spraying from an autonomous UAV to eliminate oil spills. It possible to accurately dose the dispersant depending on the thickness of the oil product layer using AI elements. Single elements of the developed tools and methods were tested at the laboratory and during actual system monitoring of the port sea waters, and showed high efficiency.

**Keywords:** oil spill response, unmanned aerial vehicle, artificial intelligence, segmentation, detection, dispersant spraying, laser spectroscopy.

**For citation:** Oleg A. Bukin, Denis A. Korovetskiy, Alexey A. Chekhlenok, Dmitriy Y. Proshchenko, Victoria F. Yurchik, Andrey M. Krivotulov, Elena A. Pyak. Development of a new technology for monitoring and elimination of emergency oil spills on the sea surface using unmanned aerial vehicles (UAVs). 2022. № 3 part 1. P. 160—169.

### Введение

Использование БВС в качестве носителей аппаратно-программных комплексов (АПК) для мониторинга морской поверхности и ликвидации последствий загрязнений нефтепродуктами морских акваторий может значительно расширить возможности по обнаружению загрязнений нефтепродуктами и методов ликвидации аварийных

разливов нефтепродуктов (ЛАРН), особенно в случае загрязнений локальных масштабов. Т.е. в тех пространственных размерах на морской поверхности, которые доступны для малогабаритных БВС. Особенно актуальна эта задача в шельфовых водах, на акваториях портов, рейдов и бункеровки судов, в местах проведения разведки и добычи углеводородов, над подводными трассами нефтепроводов. Здесь необходимо иметь

инструменты и методы, которые позволяют оперативно и относительно дешево осуществлять мониторинг сликов и определять их природу. В процессе мониторинга необходимо различить слики, вызванные гидрофизическими процессами и тонкими плёнками, которые образованы различными сортами нефтепродуктов.

Анализ данных относительно источников и объёмов загрязнения Мирового океана нефтепродуктами показывает, что загрязнения локальных масштабов неуклонно возрастают и дают значительный вклад (до 60%) в общий объём загрязнений [1,2]. Загрязнения локальных масштабов, которые происходят на территории портов, на акватории рейдов и бункеровки судов представляют наибольшую опасность в силу того, что находятся как правило в шельфовой зоне, вблизи населённых пунктов. Такие чувствительные морские акватории и зоны побережья как пляжи, морские заповедники, городские набережные являются потенциальными объектами загрязнения.

Эти объекты сложны для проведения качественного оперативного мониторинга и эффективной ликвидации загрязнений. Технологии мониторинга и ликвидации загрязнения являются технически сложными и дорогими. Привлекать к мониторингу и ликвидации, требующие специальной инфраструктуры и квалифицированного обслуживания авиационные, судовые и спутниковые методы целесообразно только в случае больших разливов. Поэтому разработка оперативных, доступных по стоимости и обслуживанию методов и технических средств мониторинга и ликвидации локальных загрязнений морских акваторий нефтепродуктами является актуальной проблемой.

С другой стороны, в последнее время наблюдается очень интенсивное развитие различных прикладных технологий с использованием БВС. Доступность использования, возможность оснащения высокими технологиями мониторинга окружающей среды и искусственным интеллектом привели к созданию отдельной индустрии БВС способной решать задачи в зондировании земной поверхности [3,4], сельском хозяйстве [5,6], строительстве [7,8], геологических и геофизических исследованиях [9,10], в сфере логистики [11], аэрофотосъёмки [12]. Проводится активная разработка методов и технических средств и для использования БВС в задачах мониторинга загрязнения морских акваторий нефтепродуктами. В работах [13-16] приведены результаты разработок метода лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) для использования на БВС в целях регистрации нефтепродуктов на водной поверхности и идентификации их сортов. В работе [17] приведены разработки пассивных методов детектирования плёнок нефтепродуктов на морской поверхности и оценки их объёмов. Разработанные к настоящему времени методы компьютерного зрения БВС, методы ЛИФ и инфракрасной спектроскопии позволяют осуществлять регулярное детектирование нефтяных плёнок на морской поверхности [18].

Однако, полная задача обеспечения экологической безопасности морских акваторий, с использованием БВС, должна включать в себя и возможность ликвидации плёнки. В настоящее время практически отсутствуют работы по использованию

БВС для проведения мероприятий ЛАРН. Распыление диспергентов с БВС для ликвидации плёнок имеет хороший потенциал практического использования для локальных масштабов [19]. Опыт использования БВС в сельском хозяйстве для распыления химикатов и удобрений на посевные площади и плодовые деревья показывает высокую производительность БВС. В настоящее время в течении светового дня осуществляется обработка, всего одним дроном, площадей порядка 160 Га. [20]. Существенный потенциал имеют БВС для ликвидации нефтяных загрязнений в Арктике, при отрицательных температурах, при наличии льда или шуги.

Совмещение двух функций (мониторинга и ликвидации загрязнений) в одном БВС не является целесообразным. Создание аппаратно-программной оболочки мониторинга БВС показало, что для его эффективного осуществления необходимо использование специализированных сенсоров, и элементов искусственного интеллекта, которые требуют как определённого энергетического обеспечения, так и определённых габаритов [17]. Т.е. функция мониторинга эффективно выполняется специализированным БВС. Это так же относится и к функции ликвидации нефтяной плёнки. Однако эти две функции неразрывно связаны и должны выполняться примерно в одно и тоже время. Таким образом, для выполнения полной функции экологической безопасности требуется разработка мультиагентной системы БВС, состоящей из БВС мониторинга и БВС ликвидации плёнок нефтепродуктов на морской поверхности.

В настоящей работе описан первый опыт разработки мультиагентной системы на основе БВС для мониторинга и ликвидации плёнок нефтепродуктов на морской поверхности. Описана система, состоящая из двух БВС.

#### **Разработка аппаратно-программной оболочки БВС для мониторинга загрязнения морских акваторий нефтепродуктами**

Миссия мониторинга включает в себя исполнение нескольких функций. Прежде всего необходимо провести детектирование пятна. Далее необходимо оценить объёмы нефтепродуктов, которые содержатся в плёнке. Для этого необходимо определить площадь пятна и его толщину. Для определения толщины плёнки необходимо разработать элемент сегментации плёнки, т.е. определение толщины отдельных сегментов пятна, на которые разбивается плёнка.

Последняя функция является довольно сложной, т.к. толщина плёнки меняется в довольно больших пределах в пределах пятна. Решению данной задачи посвящено очень много работ [21], однако к настоящему времени нет доступного для использования на БВС надёжного метода измерения толщины плёнки. В силу важности вопроса оценки объёмов нефтепродуктов в плёнке, разработана методика оценки толщины плёнки по анализу изображения различных участков плёнки (метод цветовых кодов) [22]. Она состоит в том, что изображение плёнки разбивается на участки, которым приписываются определённые цветовые коды. В зависимости от того, какой цветовой код имеет каждый участок, он обладает и определённой

толщиной. В таблице 1 приведены значения толщин плёнки в зависимости от цвета его изображения. Большая статистика наблюдений за нефтяными пятнами позволяет применять данную методику для оценки объёмов нефтепродуктов, содержащихся в плёнке [23]. Работа компонента основана на той системе кодов, которые предложены в Боннском соглашении. Каждый код определяет плёнку, которая имеет характерный цвет и может быть отнесена к определённому диапазону толщин.

Таким образом задача детектирования и определение толщины (объёмов) нефтепродуктов в пятне может быть решена с использованием компьютерного зрения БВС при адаптации в него

двух соответствующих элементов искусственного интеллекта, которые распознают само пятно, и выделяют границу пятна (разбивают пятно на сегменты, соответствующие различным цветовым кодам (различным толщинам)).

Оба элемента искусственного интеллекта были разработаны таким образом, чтобы автономно выполнять свои функции, т.е. выполнены в виде автономных аппаратно-программных подболочек: аппаратно-программной подболочки детектирования (hard-soft sub framework-1 – HSSFW1) и аппаратно-программной подболочки сегментации (HSSFW2). Аппаратная часть обоих

Таблица 1

Система кодирования внешнего вида нефти по Боннскому соглашению)

Внешний вид	Диапазон толщины слоя (мкм)
Код 1: Блестящий (серебристо-серый)	0,04 – 0,30
Код 2: Радужный	0,30 – 5
Код 3: Металл	5 – 50
Код 4: Прерывистый истинный цвет	50 – 200
Код 5: Непрерывный истинный цвет	более 200

подболочек включала в себя видеокамеру и компьютер. Программная часть подболочек включала в себя два элемента: элемент детектирования, который только определял факт наличия плёнки на морской поверхности для (HSSFW1), и элемент сегментации плёнок, который позволял отнести плёнку к определённому типу и оценить, таким образом, толщину плёнки (для HSSFW2). Первый элемент применим ко всем плёнкам вне зависимости от их толщины, включая плёнки сырой нефти. Второй элемент работает только с тонкими плёнками нефтепродуктов [17].

Процедура глубокого машинного обучения первого элемента проводилась на изображениях плёнок нефтепродуктов или сырой нефти, полученных в различные периоды при проведении съёмки реальных загрязнений с использованием БВС. При создании этого программного компонента был использован язык программирования Python. Для работы с изображениями была использована библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом OpenCV. В качестве системы с компонентом объектного детектирования была выбрана нейросетевая архитектура YOLOv3-tiny [Redmon, Joseph, and Ali Farhadi. "Yolov3: An incremental improvement." arXiv preprint arXiv:1804.02767 (2018)], имплементированная с помощью библиотеки Keras с фреймворком Tensorflow. Данная архитектура может быть использована на малопроизводительных микрокомпьютерах таких как raspberry pi 3, которые вполне подходят для использования на малогабаритном БВС. Работа этого элемента была проверена на реальном загрязнении, которое имело место в Амурском заливе. Источником загрязнения стала авария при бункеровке судна. На рис.1, приведен фрагмент

работы элемента ИИ по распознаванию нефтяного пятна. Элемент ИИ выдаёт вероятность того, что зарегистрированное пятно является плёнкой, образованной нефтепродуктами. Величина вероятности для двух плёнок показана на изображениях. В данном случае она составляет 0.86 и 0.76 соответственно, что интерпретируется ИИ как плёнки нефтепродуктов. В процессе обучения использовался критерий детектирования, согласно которому фиксация плёнки на морской поверхности происходит при значении вероятности равной 0.65. После детектирования на морской поверхности пятна, образованного нефтепродуктами, элемент ИИ может провести оценку площади загрязнения.

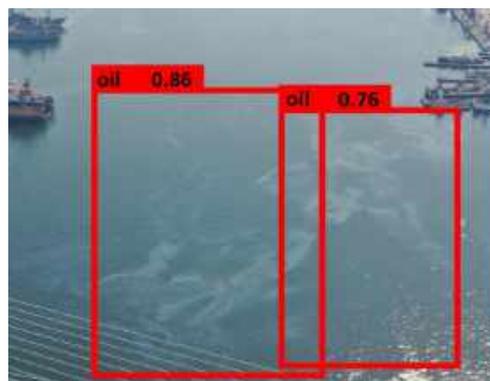


Рис. 1. Детектирование нефтяных пятен с использованием HSSFW1

Данный программный элемент для распознавания плёнок нефтепродуктов на морской поверхности представляет собой отдельный продукт, и в том случае, если не требуется измерение толщины плёнки, а только измерение площади пятна, и нет необходимости определения типов

нефтепродуктов, которые образуют нефтяную плёнку, может использоваться отдельно. В этом случае, автономное оптическое дистанционное зондирование реализуется одной видеокамерой и микрокомпьютером типа raspberry pi 3 и представляет собой очень доступный вариант для проведения детектирования плёнок нефтепродуктов на морской поверхности.

Работа подболочки HSSFW2 так же проверялась в процессе мониторинга разлива судового топлива, которое произошло при буксировке судна. При обнаружении нефтяного пятна, которое можно отнести к тонким плёнкам нефтепродуктов, область на изображении обводится по контуру обнаруженного объекта – осуществляется сегментация. Анализируемое пятно представляется в виде выделенной области на изображении. Уже выделенная сегментацией область может быть разбита на несколько других, относящихся к различным кодам (радужной, серебристой, истинный цвет и др), каждая такая область имеет свою толщину. Выделяются пиксели изображения, относящиеся к радужному, и определяется площадь радужной плёнки. Выделив, таким образом, пятна можно выполнить примерную оценку площади разлива и приписать определённые толщины всем пятнам, которые предварительно отнесены к цветовым кодам. Используя процентное соотношение этих областей и их площадь, производится оценка объема разлива нефтепродукта.

На рис. 2 приведено изображение плёнки судового топлива, которое зарегистрировано элементом детектирования (рис.2а) и результат работы элемента ИИ по сегментации нефтяного пятна (рис. 2б).

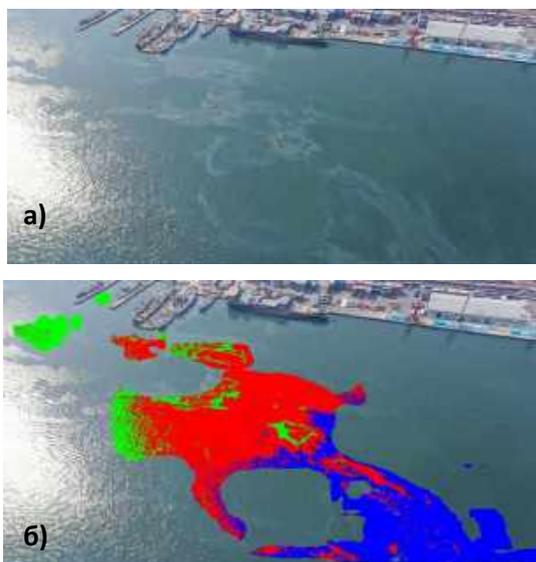


Рис. 2. Результат сегментации нефтяного пятна и классификации по различным кодам  
а) изображения плёнки нефтепродуктов  
б) результат сегментации пятна по цветовым кодам

На рис. 2б цветами показаны различные фрагменты пятна, которые классифицированы как различные типы плёнок по толщине и отнесены к различным кодам. Красный соответствует коду 1 - «серебристо-серый», зелёный фрагмент плёнки

соответствует коду 2 – «радужный», синий фрагмент коду 3 – «металл».

Для того, чтобы реализовать данный вид дистанционного зондирования необходим уже более производительный, чем raspberry pi 3, компьютер. В наших разработках мы использовали компьютер типа NVIDIA Jetson TX2, который так же может быть использован на малогабаритном дроне. Однако это приводило к удорожанию аппаратной части подболочки HSSFW2. Необходимо отметить, что в случае, если не требуется проводить измерение объёмов загрязнения в реальном времени, то процедура сегментации может осуществляться дистанционно на стационарном компьютере, где вся операция занимает время порядка нескольких минут. Оба эти элемента проходят натурные испытания и дорабатываются по результатам этих испытаний.

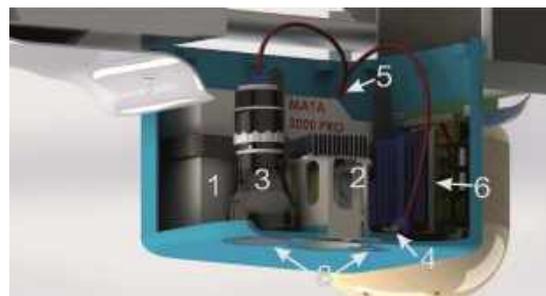
Миссия мониторинга включает в себя и функцию определения сортов нефтепродуктов, которые образуют загрязнение. Для исполнения этой функции была разработана подболочка лазерной сенсорики (HSSFW3). Аппаратный комплекс HSSFW3 представляет собой спектрометр лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ). Описание методики определения сортов нефтепродуктов по спектрам ЛИФ и аппаратуры для оснащения БВС лазерной сенсорики приведены в работах [24, 15, 17].

Программная часть подболочки HSSFW3 представляет собой элемент искусственного интеллекта, обученный на распознавание сортов нефтепродуктов по спектрам ЛИФ. Обучение осуществлялось по спектрам ЛИФ основных нефтепродуктов, которые используются в качестве судового топлива: лёгкие сорта топлива типа DMZ, DMA, дизель, керосин, и тяжёлые сорта типа RMB-30, RME-180, RMG-380.

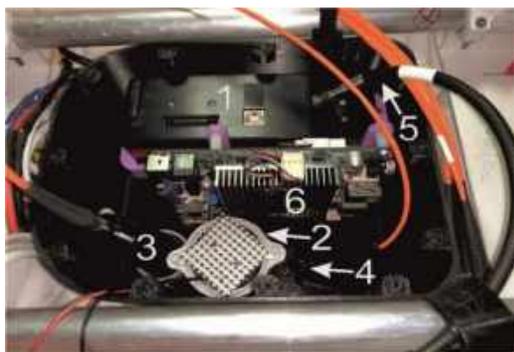
На рис.3 представлена 3D модель лазерного спектрометра для БВС (3а) и фотография спектрометра в корпусе БВС (3б).

Спектрометр позволяет регистрировать спектры ЛИФ в двух вариантах. В первом случае, когда БВС находится непосредственно над плёнкой нефтепродуктов (принимается сигнал, отражённый от плёнки, высота БВС над плёнкой в пределах от 2м до 10 м). И во втором случае, когда БВС находится в приводнённом режиме (регистрируется спектр ЛИФ от растворов нефтепродуктов в морской воде).

Элемент искусственного интеллекта подболочки HSSFW3 для автоматической классификации спектров ЛИФ нефтепродуктов по их типовой принадлежности был обучен с использованием оптимальных алгоритмов LDA и LinearSVC [25, 26].



а)



б)

Рис. 3. 3D модель лазерного спектрометра для БВС (3а) и фотография спектрометра в корпусе БВС.

а) 3D модель ЛИФ спектрометра

б) фото ЛИФ спектрометра в корпусе дрона

1 – Спектрометр ЛИФ; 2 – лазерный светодиод;

3 – коллиматор первого канала (плёнки нефтепродуктов); 4 – коллиматор второго канала (растворы нефтепродуктов); 5 – световолокно; 6 – компьютер; 7 – корпус дрона; 8 – светофильтры и оптические иллюминаторы.

Первоначально в лабораторных условиях были получены последовательности спектров для каждого исследуемого типа раствора нефтепродукта с различной концентрацией. Были использованы растворы 8-ми сортов нефтепродуктов, такие как лёгкие сорта топлива типа DMA, DMZ, дизельное топливо, керосин, а также тяжёлые сорта типа RMB 30, RMG 180, RME 380 и сырой нефти. Общее количество полученных спектров в ходе лабораторных экспериментов, для формирования обучающих Data Sets, составило более 1000 единиц. В качестве средства реализации был использован язык программирования Python с библиотеками scikit-learn и NumPy. Спектры предварительно обрабатывались, нормировались, приводились к единому формату. Далее массивы спектров различных типов нефтепродуктов использовались при составлении Data Sets для извлечения из них признаков. Сформированная из признаков описаний матрица данных использовалась для обучения методов LDA и LinearSVC. Пример работы элемента ИИ по распознаванию сорта нефтепродукта в растворе в случае использования алгоритма LinearSVC представлен на рисунке 4.

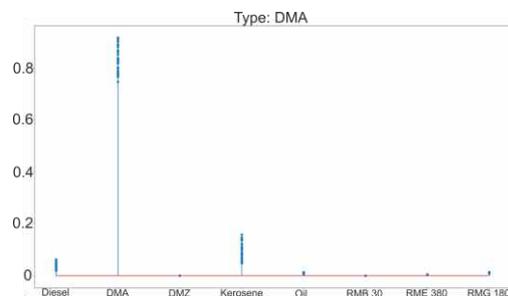


Рис. 4. Распределение вероятности (вертикальная ось) соответствия случайно выбранных 30 спектров растворов с различной концентрацией топлива DMA рассмотренным сортам растворенных нефтепродуктов в морской воде (горизонтальная ось). Алгоритм LinearSVC.

В качестве тестовых спектров были взяты 30 спектральных характеристик растворов DMA с различной концентрацией, полученные в лабораторных условиях и не использовавшиеся в процессе обучения. Согласно полученному распределению, спектры флуоресценции с 80-и процентной вероятностью соответствуют растворам легкого топлива типа DMA, что позволяет говорить о корректности работы представленной модели.

Исследования пределов обнаружения сенсорики ЛИФ показали, что для рассматриваемых сортов нефтепродуктов минимально обнаружимые концентрации находятся в пределах от 0.1 ppm до 1 ppm. Что позволяет говорить о том, что данный метод подходит для контроля сброса льяльных вод судами, в которых предельно допустимая концентрация растворённых нефтепродуктов не должна превышать величину в 15 ppm, согласно международной конвенции МАРПОЛ [27].

Использование в качестве излучателя лазерного диода с длиной волны 278 нм позволило проводить измерение спектров ЛИФ в дневное время суток. Однако, несмотря на короткую длину волны, надёжные измерения спектра удавалось получать только при отсутствии прямого солнечного излучения или в вечернее время суток.

Каждая из описанных выше подборок может использоваться автономно и отдельно на разных БВС или все три можно объединять в одну интегральную оболочку и использовать на одном БВС. Специально для целей мониторинга с полной интегральной оболочкой, был разработан БВС, фото которого приведено на рис. 5. Аппаратно-программная оболочка размещается в герметичном корпусе. БВС рассчитан на приводнение и взлёт с морской поверхности. В приводненном режиме выполняется мониторинг нефтепродуктов, растворённых в морской воде.



Рис. 5. БВС – носитель интегральной АПО мониторинга с функцией приводнения

В таблице 2. Приведены характеристики БВС, укомплектованного интегральной АПО.

#### Разработка аппаратно-программной оболочки БВС для ликвидации плёнок нефтепродуктов на морской поверхности

Возможность применения диспергентов в мероприятиях ликвидации аварийных разливов нефти предусматривается тогда, когда эффективная ликвидация разлива механическими средствами невозможна ввиду гидрометеорологических или других условий. Использование диспергентов регламентируется [28]. Однако, существуют обстоятельства, когда метод ликвидации нефтяного пятна с использованием БВС, является единственно возможным. Прежде всего это ситуации, когда требуется оперативная ликвидация для

предотвращения выноса плёнок в экологически чистые зоны (пляжи, заповедники, городские набережные и т.д.). Причём при проведении ЛАРН в этих случаях требуется «точечное» использование диспергентов, т.е. нанесение диспергентов, только на площади морской поверхности, покрытые плёнкой. Использование БВС в таких мероприятиях

является более эффективным, чем распыление с самолётов или с судов. Использование БВС в мероприятиях ЛАРН в ледовых условиях или при наличии шуги, так же может оказаться единственно возможным способом ликвидировать локальные загрязнения нефтепродуктами.

Таблица 2

**Характеристики БВС с интегральной АПО**

№	Наименование параметра	Величина	Назначение параметра	Примечание
1	Время полета: - с литиевыми аккумуляторами - с вариантом бензинового генератора	50 минут 120 минут	Соответствуют температуре воздуха 10 <sup>0</sup> С	При необходимости может быть увеличено использованием аккумуляторов большей ёмкости, или топливного бака увеличенного объема, в зависимости от типа силовой установки
2	Максимальный вес дополнительной полезной нагрузки	2,5кг		Допускается использование дополнительной нагрузки, с высоким энергопотреблением.
3	Вес дрона без полезной нагрузки	8кг		
4	Максимальная тяга двигателей	30кг		
5	Напряжение питания	44,4В (12s LiPo)		Используется импульсные стабилизаторы питания адаптирующие напряжение к каждому элементу АПК
6	Ёмкость аккумуляторных батарей	26Ач (1114Вт.ч)	Определяют общее полётное время	При необходимости может быть увеличена до 30 Ач при данной конструкции БВС
7	Максимально допустимая скорость ветра	6-8 м/с		При температурах не ниже – 20 <sup>0</sup> С
8	Наличие дополнительных передатчиков для связи между агентами	Да, на частоте 5.8/2.4 ГГц		Дальность связи до 10 км
9	Технические особенности	Выполнен в варианте квадрокоптера		Возможен полет в автономном режиме, взлет/посадка на воду как в штатном режиме, так и в аварийном.

К настоящему времени разработан широкий спектр диспергентов, которые возможно использовать в различных климатических зонах.

Обычное соотношение объёмов диспергента к объёмам нефтепродукта (ОДН), которые надо ликвидировать, составляют отношение 1:10 [29].

**Сорта диспергентов**

БВС, которые используются в сельском хозяйстве для распыления химикатов, способны нести на себе ёмкости до 50 литров. При толщине плёнки нефтепродуктов на морской поверхности равной 50 мкм, и распылении 50 литров диспергента, возможно нанести диспергент на площадь порядка 1000 кв. метров за один вылет.

Специфика использования БВС для распыления над морской поверхностью состоит в следующем. Количество распыляемого диспергента должно строго соответствовать толщине плёнки нефтепродукта, т.е. необходимо выдерживать рекомендованное значение ОДН. Толщина плёнки очень неравномерно распределена по площади разлива. Поэтому, очень важным является проведение предварительного мониторинга пятна и проведение его сегментации в соответствии с методикой, которая описана выше. Для обеспечения такого соответствия аппаратно-программная оболочка БВС для ликвидации должна быть оборудована программными элементами, которые управляют системой распыления диспергента.

Программные элементы должны распознавать сегменты на плёнке нефтепродуктов, в соответствии с процедурой сегментации, выполненной БВС, который провёл мониторинг и распылять объём диспергента в соответствии с толщиной плёнки, находящейся в момент распыления под БВС. Предложенная методика предполагает, что плёнка нефтепродуктов меняется незначительно за тот промежуток времени, который проходит между мониторингом и ликвидацией нефтепродуктов.

Второй особенностью БВС для ликвидации плёнок является обеспечение возможности БВС посадки на воду, взлёта с морской поверхности, посадки на движущееся судно, а также обеспечение полной герметичности аппаратно-программной оболочки БВС. При работе в отрицательных температурах необходимо предусмотреть и дополнительный подогрев исполнительных механизмов АПО БВС.

В таблице 3 приведены основные характеристики экспериментального варианта БВС, предназначенного для ликвидации плёнок нефтепродуктов. Аппаратно-программная оболочка и система распыления, в данном варианте, разрабатывались для отработки метода и эксперименты с распылением проводились при положительных температурах.

Таблица 3

**Основные параметры БВС для отработки методики распыления диспергентов**

№	Наименование параметра	Величина	Назначение параметра	Примечание
1	Время полета: - с полной нагрузкой - без нагрузки	25 минут 50 минут	Соответствуют температуре воздуха 10 <sup>0</sup> С	При необходимости может быть увеличено использованием аккумуляторов большей ёмкости
2	Максимальный вес диспергента	25кг (~30литров)	Допускается использование диспергента, предназначенного для отрицательных температур до – 30 <sup>0</sup> С.	Возможно увеличение веса при использовании аккумуляторов большей ёмкости
3	Вес дрона без полезной нагрузки	35кг		
4	Максимальная тяга двигателей	116кг		Рассчитана на максимальный вес диспергента
5	Напряжение питания	52В (14s LiPo)		Используется импульсные стабилизаторы питания адаптирующие напряжение к каждому элементу АПК
6	Ёмкость аккумуляторных батарей	60Ач (3108Вт.ч)	Определяют общее полётное время	При необходимости может быть увеличена до 80 Ач при данной конструкции БВС
7	Максимально допустимая скорость ветра	6-8 м/с		При температурах не ниже – 20 <sup>0</sup> С
8	Максимальная производительность системы распыления	8 л/м		Соответствует температуре воздуха не ниже – 20 <sup>0</sup> С
9	Технические особенности	Выполнен в варианте квадрокоптера		Возможен полет в автономном режиме, взлет/посадка на воду как в штатном режиме, так и в аварийном.

Были проведены натурные эксперименты по ликвидации реальных плёнок нефтепродуктов, обнаруженных при мониторинге акватории Амурского залива, с использованием БВС, который оснащён АПО мониторинга.

На рисунке 6 приведена фотография экспериментального варианта квадрокоптера, предназначенного для отработки методики ЛАПН с использованием распыления диспергентов. Была обнаружена плёнка, образованная при разливе судового топлива типа DMA. Размер пятна был порядка 20 м<sup>2</sup>, толщина плёнки оценивалась в 100 мкм, использовался диспергент UNITOR SEACARE OSD2. При температуре воздуха порядка 20<sup>0</sup> С, плёнка полностью исчезла через 20 минут.

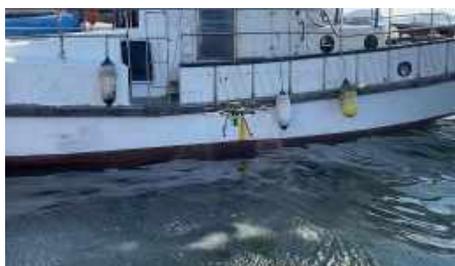


Рис. 6. Распыление диспергента на плёнку судового топлива

**Заключение**

Результаты, представленные в данной работе, являются первым этапом в создании комплексной системы обеспечения экологической безопасности морского транспорта. Эта система, представляет собой мультиагентную систему БВС, выполняющих функции мониторинга загрязнений морской поверхности нефтепродуктами и их ликвидацию.

Отдельные элементы этой системы прошли испытания в натуральных условиях. АПО БВС мониторинга на протяжении 2021 года использовалась для осуществления оперативного детектирования плёнок нефтепродуктов на акватории портов г. Владивостока. В процессе мониторинга было получено значительное число изображений плёнок, которые позволили значительно пополнить Data Set для обучения элемента искусственного интеллекта АПО в части детектирования. Предварительно был проведён анализ работы элемента детектирования с использованием различных алгоритмов детектирования: YOLO, DSSD321, R-FCN, SSD513, DSSD513, FPN, FRCN, Retinanet-101. Был выбран алгоритм детектирования YOLO, т.к. он продемонстрировал наибольшие показатели точности и производительности. Для качественной работы элемента детектирования, плёнки являются очень сложным объектом. Поэтому в некоторых случаях элемент детектирования выдаёт низкие вероятности обнаружения плёнок, хотя визуально эти плёнки хорошо определяются. Дальнейшее улучшение процесса детектирования состоит в увеличении числа изображений, которые используются в процедуре обучения элемента. Также возможно появление в дальнейшем новых более точных и производительных алгоритмов детекции, что позволит значительно улучшить процесс детектирования. Однако, опыт использования различных элементов детектирования показывает ограниченную возможность элементов детекции. Большими возможностями для совершенствования обладает элемент сегментации. В настоящее время осуществляется его совершенствование для более

точного выделения границ пятна и разбиения пятна на сегменты, согласно цветовым кодам. Этот элемент одновременно является и элементом детектирования, однако для его работы необходимы более производительные компьютеры, типа NVIDIA Jetson Xavier NX или NVIDIA Jetson AGX Xavier. Корректная работа элемента искусственного интеллекта сегментации пятна важна и для эффективного использования диспергента при ликвидации пятен нефтепродуктов. Это необходимо для определения того объема диспергента, который

используется для ликвидации сегмента плёнки с известной толщиной. Излишнее распыления диспергента делает процесс ликвидации не эффективным в части его стоимости и будет иметь негативные последствия для морской экосистемы. В связи с вышесказанным, разработка мультиагентной системы БВС, состоящих из БВС мониторинга и БВС ликвидации плёнки нефтепродуктов представляется очень перспективной.

#### Литература

1. Every six minutes, an illegal hydrocarbon dumping incident takes place in European waters URL: <https://eu.oceana.org/en/press-center/press-releases/every-six-minutes-illegal-hydrocarbon-dumping-incident-takes-place> [Дата обращения: 07.02.2022].
2. The threat of the oil pollution incident occurred in Lebanon to the northern Cyprus coasts and the importance of operational satellite monitoring system URL: [https://www.researchgate.net/figure/Percentages-of-possible-sources-of-oil-pollution-ASI\\_fig1\\_272997222](https://www.researchgate.net/figure/Percentages-of-possible-sources-of-oil-pollution-ASI_fig1_272997222). [Дата обращения: 07.02.2022].
3. Applications of unmanned aerial vehicles in geosciences: Introduction URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-018-1992-9> [Дата обращения: 07.02.2022].
4. Multitemporal accuracy and precision assessment of unmanned aerial system photogrammetry for slope-scale snow depth maps in Alpine terrain URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00024-017-1748-y> [Дата обращения: 07.02.2022].
5. Сельскохозяйственные дроны для аграрного сектора URL: <https://brlab.ru/scopes/selskoe-khozyaystvo/> [Дата обращения: 07.02.2022].
6. Дроны в сельском хозяйстве URL: [https://zarya-miass.ru/2020/12/01/drones\\_in\\_agro/](https://zarya-miass.ru/2020/12/01/drones_in_agro/) [Дата обращения: 07.02.2022].
7. Дроны в строительстве: 6 направлений, которые стимулируют БПЛА URL: <https://www.planradar.com/ru/drony-v-stroitelstve/> [Дата обращения: 07.02.2022].
8. Нам дроны строить и жить помогают URL: <https://rspectr.com/articles/925/nam-drony-stroit-i-zhit-pomogayut> [Дата обращения: 07.02.2022].
9. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X15002652?via%3Dihub> [Дата обращения: 07.02.2022].
10. Drones, making light of geophysical surveying URL: <https://www.seequent.com/drones-making-light-of-geophysical-surveying/> [Дата обращения: 07.02.2022].
11. Пеликан воздушная доставка URL: <https://ru.coex.tech/pelicanairdelivery> [Дата обращения: 07.02.2022].
12. Drone Photography Services URL: <https://dronephotographyservices.co.uk/> [Дата обращения: 22.02.2022].
13. Aquatic environment monitoring using a drone-based fluorosensor URL: [https://www.researchgate.net/figure/a-Drone-with-fluorosensor-system-b-diagram-of-the-laser-induced-fluorescence-recording\\_fig1\\_333379423](https://www.researchgate.net/figure/a-Drone-with-fluorosensor-system-b-diagram-of-the-laser-induced-fluorescence-recording_fig1_333379423) [Дата обращения: 07.02.2022].
14. Experimental tests and radiometric calculations for the feasibility of fluorescence LIDAR-based discrimination of oil spills from UAV URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.012> [Дата обращения: 07.02.2022].
15. Bukin O, Proshenko D, Alexey C, Korovetskiy D, Bukin I, Yurchik V, Sokolova I, Nadezhkin A. New Solutions of Laser-Induced Fluorescence for Oil Pollution Monitoring at Sea. Photonics. 2020; 7(2):36. <https://doi.org/10.3390/photonics7020036>
16. Bukin, O.A., Proshenko, D.Y., Chekhlenok, A.A. et al. Methods for Optical Monitoring of Oil Pollution of Sea Water Basins Using Unmanned Aerial Vehicles. Atmos Ocean Opt 32, 459–463 (2019). <https://doi.org/10.1134/S102485601904002X>
17. Bukin O, Proshenko D, Korovetskiy D, Chekhlenok A, Yurchik V, Bukin I. Development of the Artificial Intelligence and Optical Sensing Methods for Oil Pollution Monitoring of the Sea by Drones. Applied Sciences. 2021; 11(8):3642. <https://doi.org/10.3390/app11083642>
18. Drone surveillance for limiting oil spills URL: <https://www.theexplorer.no/solutions/drone-surveillance-for-limiting-oil-spills/> [Дата обращения: 07.02.2022].
19. Букин О.А., Коровецкий Д.А., Матецкий В.Т., Проценко Д.Ю. Заявка на полезную модель № 2021113558/17(070892) от 17.11.2021г. «Способ обнаружения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в акваториях портов с использованием беспилотного воздушного судна».
20. Платформа DJI Agras T30 URL: <https://drone-expert.ru/product/platforma-dji-agras-t30/> [Дата обращения: 07.02.2022].
21. Oil spill reporting resources: How we determine oil spill volume URL: <https://skytruth.org/oil-spill-reports/oil-spill-reporting-resources/how-we-determine-oil-spill-volume/> [Дата обращения: 07.02.2022].
22. BonnAgreement URL: <https://www.bonnagreement.org/> — Guidelines for Oil Pollution Detection: Investigation and Post Flight Analysis/Evaluation for Volume Estimation. — 2017. — [Дата обращения: 17.05.2021].
23. Коровецкий Д.А., Букин О.А. Метод определения массогабаритных параметров нефтяных пленок с использованием БПЛА. Сборник докладов 65-ой международной молодежной научно-технической конференции Молодежь. Наука. Инновации — 27-30 ноября 2017 г. с.374.

24. Bukin O.A., Proschenko D.Yu., Chekhlenok A.A., Golik S.S., Bukin I.O., Mayor A.Yu., Yurchik V.F. Laser Spectroscopic Sensors for the Development of Anthropomorphic Robot Sensitivity // *Sensors*. 2018. V. 18. № 6. P. 1680.
25. Linear Support Vector Classification URL: <https://scikitlearn.org/stable/modules/generated/sklearn.svm.LinearSVC.html> [Дата обращения 17.05.2021].
26. Latent Dirichlet allocation URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Latent\\_Dirichlet\\_allocation](https://en.wikipedia.org/wiki/Latent_Dirichlet_allocation) [Дата обращения 17.02.2021].
27. Julian, M. MARPOL 73/78: the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships // *M. Julian. Maritime Studies*— 2000.—P. 16-23.
28. Правила применения диспергентов для ликвидации разливов нефти СТО 318.4.02-2005. — СПб.: М-во транспорта РФ, 2005.
29. "МОРСКОЙ ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ" в двух томах, том 1. Под редакцией академика Н.Н. Исанина URL:<https://www.korabel.ru/dictionary/detail/449.html> [Дата обращения 17.02.2021].

#### References

1. Every six minutes, an illegal hydrocarbon dumping incident takes place in european waters URL: <https://eu.oceana.org/en/press-center/press-releases/every-six-minutes-illegal-hydrocarbon-dumping-incident-takes-place> [Accessed: 07.02.2022].
2. The threat of the oil pollution incident occurred in Lebanon to the northern Cyprus coasts and the importance of operational satellite monitoring system URL: [https://www.researchgate.net/figure/Percentages-of-possible-sources-of-oil-pollution-ASL\\_fig1\\_272997222](https://www.researchgate.net/figure/Percentages-of-possible-sources-of-oil-pollution-ASL_fig1_272997222). [Accessed: 07.02.2022].
3. Applications of unmanned aerial vehicles in geosciences: Introduction URL:<https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-018-1992-9> [Accessed: 07.02.2022].
4. Multitemporal accuracy and precision assessment of unmanned aerial system photogrammetry for slope-scale snow depth maps in Alpine terrain URL:<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00024-017-1748-y> [Accessed: 07.02.2022].
5. Agricultural drones for the agricultural sector URL:<https://brlab.ru/scopes/selskoe-khozyaystvo/> [Accessed: 07.02.2022].
6. Drones in agriculture URL:[https://zarya-miass.ru/2020/12/01/drones\\_in\\_agro/](https://zarya-miass.ru/2020/12/01/drones_in_agro/) [Accessed 07.02.2022].
7. Drones in construction: 6 areas that stimulate the UAV URL:<https://www.plane radar.com/ru/drony-v-stroitelstve> [Accessed: 07.02.2022].
8. Drones help us to build and live URL:<http://rspectr.com/articles/925/nam-drony-stroit-i-zhit-pomogaet> [Accessed: 07.02.2022].
9. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X15002652?via%3Dihub> [Accessed:07.02.2022].
10. Drones, making light of geophysical surveying URL:<https://www.seequent.com/drones-making-light-of-geophysical-surveying/> [Accessed: 07.02.2022].
11. Pelican air delivery URL:<https://ru.corex.tech/pelican-air-delivery> [Accessed: 07.02.2022].
12. Drone Photography Services URL: <https://dronephotographyservices.co.uk/> [Accessed: 22.02.2022].
13. Aquatic environment monitoring using a drone-based fluorosensor URL:[https://www.researchgate.net/figure/a-Drone-with-fluorosensor-system-b-diagram-of-the-laser-induced-fluorescence-recording\\_fig1\\_333379423](https://www.researchgate.net/figure/a-Drone-with-fluorosensor-system-b-diagram-of-the-laser-induced-fluorescence-recording_fig1_333379423) [Accessed: 07.02.2022].
14. Experimental tests and radiometric calculations for the feasibility of fluorescence LIDAR-based discrimination of oil spills from UAV URL:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.012> [Accessed: 07.02.2022].
15. Bukin O, Proschenko D, Alexey C, Korovetskiy D, Bukin I, Yurchik V, Sokolova I, Nadezhkin A. New Solutions of Laser-Induced Fluorescence for Oil Pollution Monitoring at Sea. *Photonics*. 2020; 7(2):36. <https://doi.org/10.3390/photonics7020036>
16. Bukin, O.A., Proschenko, D.Y., Chekhlenok, A.A. et al. Methods for Optical Monitoring of Oil Pollution of Sea Water Basins Using Unmanned Aerial Vehicles. *Atmos Ocean Opt* 32, 459–463 (2019). <https://doi.org/10.1134/S102485601904002X>
17. Bukin O, Proschenko D, Korovetskiy D, Chekhlenok A, Yurchik V, Bukin I. Development of the Artificial Intelligence and Optical Sensing Methods for Oil Pollution Monitoring of the Sea by Drones. *Applied Sciences*. 2021; 11(8):3642. <https://doi.org/10.3390/app11083642>
18. Drone surveillance for limiting oil spills URL:<https://www.theexplorer.no/solutions/drone-surveillance-for-limiting-oil-spills/> [Accessed: 07.02.2022].
19. Bukin O.A., Korovetskiy D.A., Matetskiy V.T., Proschenko D.Yu. Application for utility model No. 2021113558/17(070892) dated 17.11.2021 "A method for detecting and eliminating oil and petroleum product spills in the waters of ports using an unmanned aircraft.
20. "Platform" DJI Agras T30 URL:<https://drone-expert.ru/product/platforma-dji-agras-t30/> [Accessed: 07.02.2022].
21. Oil spill reporting resources: How we determine oil spill volume URL: <https://skytruth.org/oil-spill-reports/oil-spill-reporting-resources/how-we-determine-oil-spill-volume/> [Accessed: 07.02.2022].
22. Bonn Agreement URL: <https://www.bonnagreement.org/> —Guidelines for Oil Pollution Detection: Investigation and Post Flight Analysis/Evaluation for Volume Estimation. — 2017. — [Accessed: 17.05.2021].
23. Korovetskiy D.A., Bukin O.A. Method for determining the weight and size parameters of oil films using UAVs. Collection of reports of the 65th International Youth Scientific and Technical Conference Youth. The science. Innovations — November 27-30, 2017 p.374.

24. Bukin O.A., Proshchenko D.Yu., Chekhlenok A.A., Golik S.S., Bukin I.O., Mayor A.Yu., Yurchik V.F. Laser Spectroscopic Sensors for the Development of Anthropomorphic Robot Sensitivity // Sensors. 2018. V. 18. № 6. P. 1680.
25. Linear Support Vector Classification URL: <https://scikitlearn.org/stable/modules/generated/sklearn.svm.LinearSVC.html> [Accessed 17.05.2021].
26. Latent Dirichlet allocation URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Latent\\_Dirichlet\\_allocation](https://en.wikipedia.org/wiki/Latent_Dirichlet_allocation) [Accessed 17.02.2021].
27. Julian, M. MARPOL 73/78: the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships //M. Julian. Maritime Studies— 2000.—P. 16-23.
28. Rules for the use of dispersants for the elimination of oil spills STO 318.4.02-2005. - St. Petersburg: Ministry of Transport of the Russian Federation, 2005.
29. "MARINE ENCYCLOPEDIA DICTIONARY" in two volumes, volume 1. Edited by academician N.N. Isanin URL: <https://www.korabel.ru/dictionary/detail/449.html> [Accessed 17.02.2021].

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

**Олег Алексеевич Букин**, доктор физико-математических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского., 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: o\_bukin@mail.ru.

**Денис Андреевич Коровецкий**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник НИК морской технопарк, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского., 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: 318704@mail.ru.

**Алексей Анатольевич Чехленок**, младший научный сотрудник НИК морской технопарк, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского., 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: 79242427448@ya.ru.

**Дмитрий Юрьевич Прощенко**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией подводной робототехники НИК морской технопарк, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского., 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: dima.prsk@mail.ru.

**Виктория Федоровна Юрчик**, младший научный сотрудник НИК морской технопарк, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского., 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: vita\_yurchik@mail.ru.

**Андрей Михайлович Кривотулов**, аспирант, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского., 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: ghhf-2011@mail.ru.

**Елена Александровна Пяк**, аспирант, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского., 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: helen-devil@mail.ru

**Oleg A. Bukin**, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Maritime State University. adm. G. I. Nevelskoy., 690003, Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a, e-mail: o\_bukin@mail.ru.

**Denis A. Korovetsky**, Ph.D. (Eng), Junior Researcher, NIK Marine Technopark, Maritime State University. adm. G. I. Nevelskoy., 690003, Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a, e-mail: 318704@mail.ru.

**Alexey A. Chekhlenok**, Junior Researcher, NIK Marine Technopark, Maritime State University. adm. G. I. Nevelskoy., 690003, Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a, e-mail: 79242427448@ya.ru.

**Dmitriy Y. Proshchenko**, Ph.D. (Phys & Math), Head of the Laboratory of Underwater Robotics, NIK Marine Technopark, Maritime State University. adm. G. I. Nevelskoy., 690003, Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a, e-mail: dima.prsk@mail.ru.

**Victoria F. Yurchik**, Junior Researcher, NIK Marine Technopark, Maritime State University. adm. G. I. Nevelskoy., 690003, Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a, e-mail: vita\_yurchik@mail.ru.

**Victoria F. Yurchik**, graduate student, Maritime State University named after adm. G. I. Nevelskoy., 690003, Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a, e-mail: ghhf-2011@mail.ru..

**Elena A. Pyak**, graduate student, Maritime State University named after adm. G. I. Nevelskoy., 690003, Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a, e-mail: helen-devil@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 06.08.2022.

Научная статья

УДК 621.396.65

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.022>

## Радиоканал в телеуправлении необитаемыми подводными аппаратами

М.М. Шилин<sup>1</sup> shilin\_m\_m@corp.smtu.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация** Радиоканал обмена данными в диапазоне ультракоротких волн (УКВ) представляет собой эффективный и гибкий инструмент для организации связи в реальном масштабе времени на относительно большие расстояния на земле, под землёй, в воздухе (космосе) и на воде. В настоящей статье рассмотрена классическая схема управления работой телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) с использованием кабеля, представлен вариант применения УКВ-радиоканала в составе комбинированного канала связи для обеспечения работы ТНПА при решении комплекса оперативных задач в интересах различных организаций и ведомств, а также отражены перспективы развития телеуправления по комбинированному каналу связи при групповом использовании ТНПА. Приведены результаты натурных испытаний по оценке дальности обеспечения связи с помощью такого канала, отражающие возможности реализации полудуплексной связи на расстоянии не менее 12000 м при передаче сигнала над водной поверхностью.

**Ключевые слова:** телеуправление, телеуправляемый подводный аппарат, радиоканал, буй-ретранслятор, радиомодем, УКВ-канал.

**Благодарности:** автор выражает благодарность Сергею Александровичу Маргаряну за консультирование и предоставление информации по радиомодемам.

**Для цитирования:** Шилин М.М. Радиоканал в телеуправлении необитаемыми подводными аппаратами, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 170—174.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.022>

## Radio channel in remote control of unmanned underwater vehicles

Mikhail M. Shilin<sup>1</sup> shilin\_m\_m@corp.smtu.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** An ultrashort wave (VHF) radio channel is an effective and flexible tool for organizing real-time communications over relatively long distances on the ground, underground, in the air (space) and on water. This article discusses the classical scheme for controlling the operation of a remotely operated unmanned underwater vehicle (ROV) using a cable, presents an option for using a VHF radio channel as part of a combined communication channel to ensure the operation of ROV when solving a set of operational tasks in the interests of various organizations and departments, and also reflects the prospects development of telecontrol via a combined communication channel for group use of ROVs. The results of full-scale tests on estimating the range of providing communication using such a channel are given, reflecting the possibility of implementing half-duplex communication at a distance of at least 12000 m when transmitting a signal over the water surface.

**Key words:** remote control, remote-controlled unmanned underwater vehicle, radio channel, repeater buoy, radio modem, VHF-channel.

**Acknowledgments:** The author expresses his gratitude to Sergey A. Margaryan for consulting and providing information on radio modems.

**For citation:** Mikhail M. Shilin, Radio channel in remote control of uninhabitable underwater vehicles, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 170—174.

### Введение

Необитаемые подводные аппараты (НПА) используются для решения широкого круга задач как гражданского, так и военного назначения. Применение различного рода НПА (автономных, телеуправляемых или буксируемых) позволяет проводить различные научные (геологические, биологические, океанографические, геофизические, геохимические, акустические, оптические) исследования, а также аварийно-спасательные, подводно-технические работы и работы военного назначения.

В данной статье рассматривается применение телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА).

### 1. Классическая схема управления работой ТНПА по проводному каналу связи

В настоящее время типовая схема управления телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами предполагает использование комплекса управления, включающего в себя размещаемую на судне-носителе систему удалённого управления, кабельную систему обмена данными, включающую в себя катушку носителя с кабелем и размещаемую на ТНПА аппаратную катушку с кабелем, а также бортовой блок телеуправления. В процессе работы

ТНПА «привязан» к судну-носителю кабелем, по которому в реальном масштабе времени поддерживается связь. По кабелю передаются данные от гидроакустических, магнитометрических и оптических (видео- или фотокамеры) средств обнаружения, а также управляющие команды. Обычно в процессе работы максимальное удаление ТНПА от судна-носителя составляет сотни метров, при этом рабочая глубина аппарата может достигать нескольких километров.

Вариант организации управления работой ТНПА с использованием кабеля представлен на рисунке 1 [1].

Характер выполняемых ТНПА работ по одному из основных предназначений – поиску и обследованию затонувших объектов – предполагает действия в заранее определённой зоне. В случае, когда точные данные о нахождении заданного объекта неизвестны, размеры зоны поиска оказываются значительными, а время для её обследования с помощью одного аппарата недопустимо продолжительным. При использовании существующей схемы судно-носитель не может удалиться от ТНПА на расстояние, превышающее длину кабеля телеуправления, а одновременное использование нескольких ТНПА для повышения производительности выполняемых работ затруднено из-за высокой вероятности запутывания кабелей телеуправления.

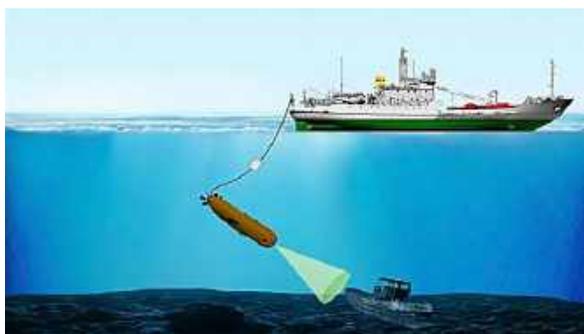


Рис. 1. Вариант организации управления работой ТНПА с использованием кабеля

## 2. Модифицированная схема управления работой ТНПА по комбинированному каналу связи

Исключить вышеупомянутые ограничения позволяет внедрение радиоканала обмена данными. Например, в настоящее время такую схему реализовал Концерн «НПО «Аврора» [2] в своём автономном НПА с использованием широкополосного канала обмена данными диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) стандарта IEEE 802.11 (WiFi), при нахождении НПА в надводном положении. В соответствии с данным стандартом, гарантированная дальность обмена данными в таком канале на открытой местности составляет порядка 150 метров. По заявлению разработчиков, за счёт использования дополнительных настроек удаётся увеличить дальность работы до 1200 метров, но при этом надёжность работы радиоканала на дальности, близкой к предельной, оказывается невысокой.

Принципиального увеличения дальности надёжной связи с подводным аппаратом удаётся достичь за счёт использования радиомодемов УКВ

диапазона. При этом предполагается использовать следующую схему: интегрированный с ТНПА связной буй-ретранслятор всплывает на поверхность воды после погружения ТНПА по команде бортового контроллера. Оставаясь на поверхности воды, он обеспечивает связь с системой удалённого управления, расположенной на судне-носителе по радиоканалу (радиосети), и с аппаратным блоком телеуправления ТНПА через кабельную линию.

Вариант организации управления работой ТНПА с использованием радиоканала представлен на рисунке 2.

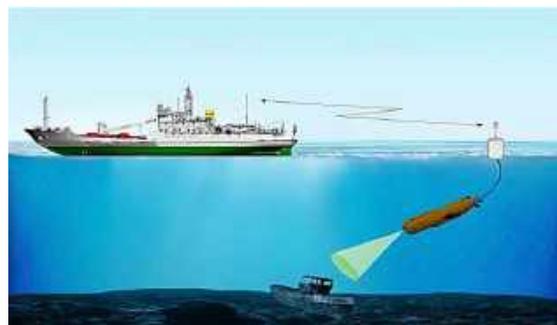


Рис. 2. Вариант организации управления работой ТНПА с использованием радиоканала

Антенна буя-ретранслятора является гибкой, что позволяет компактно размещать её в скрученном состоянии внутри буя-ретранслятора. Раскрытие антенны производится автоматически после всплытия буя на поверхность воды перед началом эксплуатации ТНПА.

На первом этапе для организации радиоканала применяется радиомодем Guardian-100 фирмы CalAmp [3]. Внешний вид радиомодема представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Радиомодем Guardian-100

Данный радиомодем работает в диапазоне частот 136-174 МГц, имеет симплексный, полудуплексный и дуплексный режимы, обеспечивая скорость передачи данных до 19.2 кбит/с.

Выбор данного модема для решения стоящей задачи был сделан с учётом существующих возможностей системы управления ТНПА и применяемых последовательных интерфейсов. При этом скорость обмена данными в технологической радиосети позволяет надёжно доводить управляющие команды на борт ТНПА и принимать от последнего информацию с размещённых на нём средств обнаружения различных типов (кроме видеокамер).

Применение интегрированного в систему управления ТНПА буя-ретранслятора, наряду с расширением возможностей по обмену данными между ТНПА и судном-носителем, позволяет упростить и повысить точность навигации за счёт

использования данных от средств глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) [4], размещаемых внутри буя и способных принимать сигналы на постоянной основе, либо сеансами, в зависимости от выполняемой задачи [5].

Одновременное использование нескольких ТНПА может обеспечиваться средствами технологической радиосети обмена данными, реализованной на описанном выше оборудовании. Учитывая пропускную способность радиосети на радиомодемах Guardian при работе на номинальную дальность 12 км, после модернизации управляющего программного обеспечения, допускается одновременное применение нескольких ТНПА. Это обеспечит следующие преимущества при выполнении основных задач оперативного предназначения:

- свободу перемещения судна-носителя вследствие отсутствия прямой жёсткой связи с ТНПА через кабель;
- расширение зоны действия ТНПА;
- одновременное решение задач оперативного предназначения в нескольких зонах;
- сокращение необходимого наряда судов для выполнения поставленной задачи;
- отсутствие привязки оператора телеуправления к бортовой системе телеуправления [1].

### 3. Результаты натурных испытаний радиоканала

Номинальная дальность канала связи  $D$  зависит от высоты установки приёмно-передающей антенны на судне-носителе  $h_1$  и на буй-ретрансляторе  $h_2$ , и согласно [6], определяется соотношением высот этих антенн:

$$D = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}).$$

Для экспериментальной проверки дальности передачи сигнала по каналу связи, были проведены натурные испытания на полигоне Ладожского озера. Один радиомодем (PM1) Guardian-100 и с УКВ-антенной, поднятой на высоту  $h_1 = 5$  м, и ноутбуком был установлен на борту катера, стоящего на якоре. Буй-ретранслятор с установленным внутри него вторым радиомодемом Guardian-100 и УКВ-антенной (PM2), опускался с борта второго катера на поверхность воды. Высота антенны на буй-ретрансляторе составляла  $h_2 = 0,5$  м. При этом второй катер последовательно отходил от первого и совершал остановки через каждые 500 м, во время которых производились сеансы связи с опущенного в воду буй-ретранслятора. Волнение воды составляло ~0.5 балла.

Номинальная дальность канала связи при таких значениях  $h_1$  и  $h_2$  составит  $D = 10,5$  км.

При приёме сигналов производилась оценка их целостности и запись специализированным программным обеспечением количества «целых» и «битых» сигналов.

Связь осуществлялась в симплексном режиме сначала в одну сторону (от PM2 к PM1), затем в другую (от PM1 к PM2). Результаты испытаний в виде процентного соотношения количества «целых» принятых сигналов от количества отправленных, приведены на рисунке 4.

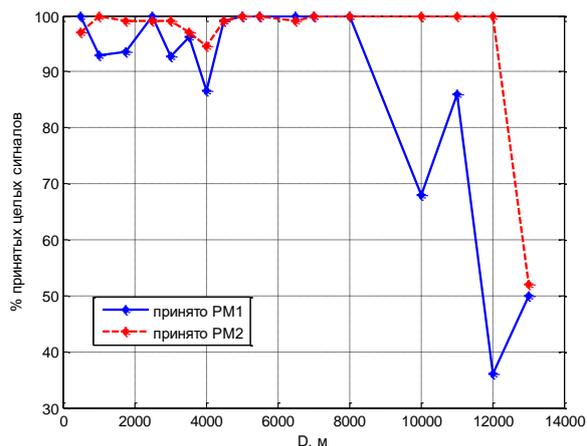


Рис. 4. Результаты натурных испытаний радиоканала

Как видно из рисунка, экспериментальная дальность связи, при которой количество «целых» принятых сигналов было более 50%, оказалась даже немного выше расчётной.

### 4. Перспективы развития телеуправления по комбинированному каналу связи

Существенное расширение возможностей существующей системы удалённого управления ТНПА может быть достигнуто за счёт применения более современных сетевых протоколов и интерфейсов. В качестве наиболее перспективных рассматриваются протокол IP и интерфейс Ethernet. Их использование позволит организовать не только надёжное одновременное управление группой аппаратов в расширенной зоне ведения поиска, но и обеспечить непрерывный контроль технического состояния электронного оборудования ТНПА с возможностью его удалённой подстройки.

Вариант организации одновременного управления работой группы ТНПА с использованием радиоканала представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Вариант организации одновременного управления работой группы ТНПА с использованием технологической радиосети

Реализация такого варианта применения ТНПА повышает требования к обеспечивающей их работу технологической радиосети обмена данными. В этом случае предполагается переход к использованию радиомодемов радиотехнической платформы Viper-SC+, имеющих более высокую скорость обмена данными и поддерживающими работу по IP-протоколу.



Рис. 6. Радиомодем Viper-SC+

Данный радиомодем может работать как в диапазоне ОВЧ (136-174 МГц), так и в диапазонах УВЧ (406-512 МГц) и 900 МГц. Он имеет симплексный и полудуплексный режимы работы, обеспечивая пакетную передачу данных на скорости до 256 кбит/с [7].

Следует отметить, что радиомодемы Guardian и Viper-SC+ имеют унифицированный корпус и одинаковую схему крепления, поэтому их установка внутрь буя-ретранслятора не потребует доработки его конструкции.

Радиосеть может быть реализована либо с использованием только радиомодемов Viper-SC+, либо с установкой на судне-носителе профессиональной базовой станции Viper-SC+ base station [8]. В последнем случае можно повысить надёжность работы радиосети за счёт использования встроенной функции автоматического выбора скорости обмена данными в зависимости от уровня мощности принимаемого сигнала. По мере удаления от судна-носителя радиосигнал будет терять свою мощность. В радиосети на радиомодемах Viper-SC+ для поддержания связи на увеличенную дальность придётся в ручном режиме подбирать оптимальную скорость обмена данными. Базовая станция будет выполнять эту функцию автоматически, поддерживая надёжный обмен данными с изменением дальности до ТНПА.

Технические характеристики радиоканала позволяют эффективно управлять аппаратом при решении широкого спектра оперативных задач. Среди них поиск и инспекция стационарных подводных потенциально опасных объектов, освещение подводной обстановки, включая контроль подвижных подводных объектов за счёт использования быстро

устанавливаемых/свариваемых гидроакустических решёток, связь с которыми может поддерживаться также по каналам узкополосной технологической радиосети обмена данными УКВ диапазона.

Более высокая пропускная способность технологической радиосети на радиомодемах Viper-SC+ позволяет установить на борту ТНПА и успешно использовать дополнительные средства обнаружения, включая видеокamеры. Использование более высокой скорости обмена данными, необходимой для передачи видеосигнала, будет сопровождаться сокращением дальности работы, но она всё равно будет в несколько раз выше, чем при применении WiFi или альтернативного гидроакустического канала связи.

Следует отметить, что описанный в настоящей статье способ обмена данными может эффективно использоваться и для связи с автономными НПА.

### Заключение

1. Связь между судном-носителем и телеуправляемым необитаемым подводным аппаратом может быть организована с помощью современных узкополосных радиомодемов, работающих в диапазоне ультракоротких волн. Такой вариант позволяет увеличить дальность работы и расширить рабочую зону ТНПА с существующих 1,2 км до 12 км, что подтверждается результатами натурных испытаний.

2. Использование узкополосной технологической радиосети обмена данными УКВ диапазона позволяет существенно расширить возможности современных судов-носителей за счёт обеспечения управления одновременной работой нескольких ТНПА, действующих в одной или различных оперативных зонах.

3. Использование предложенных вариантов организации управления подводными аппаратами позволяет повысить эффективность операций с использованием ТНПА и существенно снизить финансовые затраты на их проведение за счёт сокращения необходимого наряда судов-носителей и значительного расширения зоны, выполнение задач в которой производится одним судном. При этом может быть многократно сокращены сроки выполнения задач оперативного предназначения.

### Литература

1. Костин, М.Ю. Новый подход к телеуправлению необитаемыми подводными аппаратами / М.Ю. Костин, М.М. Шилин. – Текст: непосредственный // Неделя науки СПбГМТУ-2020: сборник докладов Всероссийского фестиваля науки «Наука 0+»: в 2 т. – Т.1. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2020. – с.511-517.
2. Каталог подводных роботов // Robotrends: [сайт] – 2022. – URL: <http://robotrends.ru/robopedia/katalog-podvodnyh-robotov> (дата обращения 27.07.2022). – Текст: электронный
3. Guardian (Гардиан) - высокоскоростной радиомодем // Dataradio: [сайт]. – 2022. – URL: [http://dataradio.ru/radiomodem/dataradio/calamp\\_guardian.htm](http://dataradio.ru/radiomodem/dataradio/calamp_guardian.htm) (дата обращения 27.07.2022). – Текст: электронный
4. Глобальная навигационная спутниковая система (GNSS - Global Navigation Satellite System) – спутниковые системы (наиболее распространены GPS и ГЛОНАСС), используемые для определения местоположения в любой точке земной поверхности с применением специальных навигационных или геодезических приемников. GNSS-технология нашла широкое применение в геодезии, городском и земельном кадастре, при инвентаризации земель, строительстве инженерных сооружений, в геологии // Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет: [сайт]. – 2022. – URL: [http://ngasu.ru/geodesy/classification/chastnye-klassifikatsii/10\\_GNSS.php](http://ngasu.ru/geodesy/classification/chastnye-klassifikatsii/10_GNSS.php) (дата обращения: 27.07.2022). – Текст: электронный
5. Технический бюллетень №23 «Технологическая радиосеть обеспечения применения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов» // Технический бюллетень «Узкополосные технологические радиосети управления и сбора данных УКВ-диапазона» – ООО «НЦПР» – 2022. – Текст: электронный

6. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов / М.П. Долуханов. – М.: Связь, 1972. – 336 с. – Текст: непосредственный
7. Радиомодем Viper-SC+ // Flexlab: [сайт]. – 2022. – URL: <https:flexlab.ru/product/supply/platform-viper/radiomodem-viper-sc> (дата обращения 27.07.2022). – Текст: электронный
8. Базовая станция Viper SC+ base station// Flexlab: [сайт]. – 2022. – URL: <https:flexlab.ru/product/supply/platform-viper/base-station-viper-sc-base-station> (дата обращения 27.07.2022). – Текст: электронный

#### References

1. Kostin, M.YU. Novyj podhod k teleupravleniyu neobitaemyimi podvodnymi apparatami [A new approach to remote control of unmanned underwater vehicles] / Nedelya nauki SPbGMTU-2020: sbornik dokladov Vserossijskogo festivalya nauki «Nauka 0+»: v 2 t. – T.1. – SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2020. – s.511-517.
2. Katalog podvodnyh robotov [Catalog of underwater robots]// Robotrends: 2022. URL: <http:robotrends.ru/robopedia/katalog-podvodnyh-robotov>
3. Guardian (Gardian) - vysokoskorostnoj radiomodem // Dataradio: [sajt]. – 2022. – URL: [http:dataradio.ru/radiomodem/dataradio/calamp\\_guardian.htm](http:dataradio.ru/radiomodem/dataradio/calamp_guardian.htm) (data obrashcheniya 27.07.2022). – Текст: elektronnyj.
4. Global'naya navigacionnaya sputnikovaya sistema (GNSS - Global Navigation Satellite System) // Nizhegorodskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet: 2022.URL: [http:nngasu.ru/geodesy/classification/chastnye-klassifikatsii/10\\_GNSS.php](http:nngasu.ru/geodesy/classification/chastnye-klassifikatsii/10_GNSS.php)
5. Tehnicheskij bjulleten' №23 «Tehnologicheskaja radioset' obespechenija primenenija teleupravlyaemyh neobitaemyh podvodnyh apparatov» [Technical Bulletin No. 23 "Technological radio network for the use of remote-controlled uninhabited underwater vehicles"] // Tehnicheskij bjulleten' «Uzkopolosnye tehnologicheskie radioseti upravlenija i sbora dannyh UKV-diapazona» – ООО «NCPR». 2022.
6. Doluhanov M. P. Rasprostranenie radiovoln. [Propagation of radio waves] / M.: Izd. Svyaz', 1972. p. 336.
7. Radiomodem Viper-SC+ // Flexlab: 2022. – URL: <https:flexlab.ru/product/supply/platform-viper/radiomodem-viper-sc>
8. Viper SC+ base station// Flexlab: 2022. – URL: <https:flexlab.ru/product/supply/platform-viper/base-station-viper-sc-base-station>

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

**Михаил Михайлович Шилин**, кандидат технических наук, доцент кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 197046, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 5, e-mail: [shilin\\_m\\_m@corp.smtu.ru](mailto:shilin_m_m@corp.smtu.ru)

**Mikhail M. Shilin**, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of Marine Information Systems and Technologies, St. Petersburg state marine technical University, Kronverksky, 5, St Petersburg, 197046, Russian Federation, e-mail: [shilin\\_m\\_m@corp.smtu.ru](mailto:shilin_m_m@corp.smtu.ru)

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.08.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 16.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.08.2022.

Научная статья

УДК 535.372:004.891.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.023>

## Разработка аппаратно-программных средств для мониторинга нефтяных загрязнений с возможностью интеграции на телеуправляемые необитаемые подводные аппараты

Д.Ю.Проценко<sup>1,2</sup> [dima.prsk@mail.ru](mailto:dima.prsk@mail.ru), О.А.Букин<sup>1,2</sup> [o\\_bukin@mail.ru](mailto:o_bukin@mail.ru), А.А.Чехленок<sup>2</sup> [alexeyche88@gmail.com](mailto:alexeyche88@gmail.com),  
И.О.Букин<sup>1</sup> [il\\_bukin@mail.ru](mailto:il_bukin@mail.ru), Д.А.Коровецкий<sup>1</sup> [318704@mail.ru](mailto:318704@mail.ru), С.С.Голик<sup>2</sup> [golik\\_s@mail.ru](mailto:golik_s@mail.ru),  
И.В.Соколова<sup>1</sup> [isokolova@msun.ru](mailto:isokolova@msun.ru), А.В.Надежкин<sup>1</sup> [Nadezkin@msun.ru](mailto:Nadezkin@msun.ru)

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

**Аннотация** Разработан аппаратно-программный комплекс для идентификации следов нефтепродуктов в морской воде с возможностью интеграции на телеуправляемые необитаемые подводные аппараты типа Rovbuilder 660 и 660D. В лабораторных условиях получены спектральные характеристики флуоресценции и определены пределы обнаружения растворов легких сортов топлива типа DMA, DMZ и тяжелых типов судового топлива RMB30, RME180 в морской воде. Для автоматического распознавания исследуемых сортов нефтепродуктов был разработан программный компонент с элементами искусственного интеллекта с использованием языка программирования Python с библиотеками scikit-learn и NumPy. Данный программный компонент позволяет осуществлять типовую классификацию растворенных в морской воде исследуемых сортов нефтепродуктов с вероятностью выше 80 %. Установлена возможность практического применения разработанного комплекса согласно критериям чистых вод по конвенции МАРПОЛ (допустимый предел концентрации растворенных нефтепродуктов менее 15 ppm).

**Ключевые слова:** экологический мониторинг, спектроскопия, ТНПА, нефтепродукты

**Финансирование:** Работа поддержана грантом государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FZNS-2020-0003 № 0657-2020-0003.

**Для цитирования:** Проценко Д.Ю., Букин О.А., Чехленок А.А., Букин И.О., Коровецкий Д.А., Голик С.С., Соколова И.В., Надежкин А.В. Разработка аппаратно-программных средств для мониторинга нефтяных загрязнений с возможностью интеграции на телеуправляемый необитаемый подводный аппарат.. 2022. № 3 часть 1, С. 175—180.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.023>

## Development of hardware and software equipment for oil pollution monitoring with the possibility of integration into remotely operated vehicles

Dmitriy Yu. Proshenko<sup>1,2</sup> [dima.prsk@mail.ru](mailto:dima.prsk@mail.ru), Oleg A. Bukin<sup>1,2</sup> [o\\_bukin@mail.ru](mailto:o_bukin@mail.ru),  
Aleksey A. Chekhlenok<sup>2</sup> [alexeyche88@gmail.com](mailto:alexeyche88@gmail.com), Ilya O. Bukin<sup>1</sup> [il\\_bukin@mail.ru](mailto:il_bukin@mail.ru),  
Denis A. Korovetsky<sup>1</sup> [318704@mail.ru](mailto:318704@mail.ru), Sergey S. Golik<sup>2</sup> [golik\\_s@mail.ru](mailto:golik_s@mail.ru), Irina V. Sokolova<sup>1</sup> [isokolova@msun.ru](mailto:isokolova@msun.ru),  
Andrey V. Nadezhkin<sup>1</sup> [Nadezkin@msun.ru](mailto:Nadezkin@msun.ru)

<sup>1</sup> Maritime State University. G.I. Nevelskoy, <sup>2</sup> Laboratory of Analytical Laser Spectroscopy, Far Eastern Federal University

**Abstract.** A hardware-software complex has been developed for identifying traces of oil products in sea water with the possibility of integration into a remote-controlled unmanned underwater vehicle “Rovbuilder 600” and “Rovbuilder 660D” type. Under laboratory conditions, the spectral characteristics of the fluorescence of solutions were obtained and the limits of detection of light fuel such as DMA, DMZ and heavy types of marine fuel RMB30, RME180 in sea water were determined. For automatic recognition of the studied varieties of oil products, a software component with elements of artificial intelligence was developed using the Python programming language with the scikit-learn and NumPy frameworks. This software component allows for a typical classification of the studied varieties of oil products dissolved in sea water with a probability of more than 80%. The possibility of application of the developed complex in accordance with the criteria for clean water under the MARPOL Convention has been established (permissible concentration limit of dissolved petroleum products is less than 15 ppm).

**Keywords:** environmental monitoring, spectroscopy, ROV, oil products

**Financial Support:** The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education, state assignment FZNS-2020-0003 № 0657-2020-0003.

**For citation:** Dmitriy Yu. Proshenko, Oleg A. Bukin, Aleksey A. Chekhlenok, Ilya O. Bukin, Denis A. Korovetsky, Sergey S. Golik, Irina V. Sokolova, Andrey V. Nadezhkin Development of hardware and software equipment for oil pollution monitoring with the possibility of integration into remotely operated vehicles. 2022. № 3 part 1. P. 175—180.

## Введение

Задача своевременного обнаружения следов утечки различных типов нефтепродуктов имеет приоритетное значение в вопросах обеспечения экологической безопасности морских экосистем. Это связано с тем обстоятельством, что нефтяные загрязнения приводят к нарушению естественных биологических процессов и взаимосвязей, существенно изменяют условия обитания всех видов живых организмов и обладают аккумулятивным эффектом в морской флоре и фауне, что в результате оказывает пагубное влияние на морскую биоту. Важность оперативного реагирования на нефтяные антропогенные загрязнения обусловлена высокой скоростью распространения нефтяных разливов [1]. Т.о. даже небольшая утечка нефтепродуктов способна причинить существенный экологический и экономический ущерб.

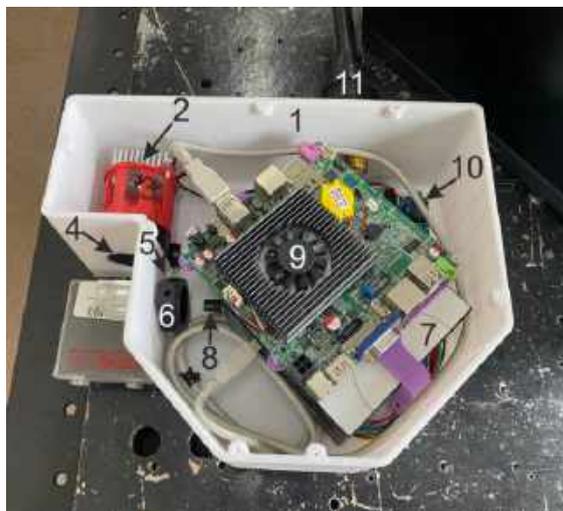
В настоящее время отсутствуют доступные и оперативные средства определения следов утечки нефтепродуктов в труднодоступных подводных областях на буровых платформах и транспортных трубопроводах. Одним из вариантов решения является использование телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов, снабженных специализированным оборудованием для регистрации следов утечки нефтепродуктов. В качестве чувствительного и оперативного дистанционного способа детектирования следов растворенных фракций и эмульсий углеводородов на поверхности и в толще воды может выступать метод индуцированной флуоресценции [2-4]. Различные типы нефтепродуктов имеют ярко выраженное свечение флуоресценции и характерные спектральные свойства, что дает возможность дифференцировать различные классы углеводородов. Т.о. с помощью данного метода можно разделить нефтепродукты на легкие и тяжелые фракции, а также произвести идентификацию конкретного сорта топлива. Данные особенности можно использовать для создания специализированного программного компонента для анализа спектров индуцированной флуоресценции морской воды с применением технологий машинного обучения.

В данной статье рассматривается промежуточный этап разработки подводного аппаратно-программного комплекса на основе метода индуцированной флуоресценции с функцией автоматической идентификации типа нефтепродукта и возможностью интеграции на телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА) типа Rovbuilder 660 или 660D [5] для обнаружения следов растворенных нефтепродуктов в морской воде.

## 2. Основные элементы подводного спектрометра

Предлагаемый вариант компоновки аппаратно-программного комплекса был реализован в виде макета подводного спектрометра, представленного на рисунке 1. Макет состоит из корпуса (1), радиатора со светодиодом LEUVA66H70HF00 (LG) (2), оптической системы для формирования

квазипараллельного излучения (3), выходного иллюминатора (4), входного иллюминатора (5), фильтра 10CGA-295 (Newport) (6) для отсеивания длины волны исходного излучения, спектрометра Maya 2000Pro (Ocean Optics) (7) с коллиматором 74-ud (Ocean Optics) (8), процессорной платы ITX-N29 (9), преобразователя напряжения LM2596 DC-DC (10) и герморазъема SubConn (11). Корпус был напечатан на 3D принтере из Pet пластика.



*Рис. 1. Лабораторный макет спектрометра на основе метода индуцированной флуоресценции с программным элементом классификации по типовой принадлежности растворенных в морской воде различных типов нефтепродуктов*

В данном макете подводного спектрометра ультрафиолетовое излучение формировалось с помощью светодиода, монтированного на алюминиевый радиатор. Транспортировка излучения в кварцевую кювету с исследуемой пробой осуществлялась по атмосферной трассе с помощью оптической системы, состоящей из кварцевой линзы диаметром 75 мм и с фокусным расстоянием 100 мм. Светодиод располагался в области перетяжки линзы для формирования квазипараллельного пучка. Мощность излучения составляла порядка 70 мВт. В качестве регистратора спектров использовался спектрометр Maya 2000 Pro и коллиматором 74-UV (Ocean Optics). Оптическая приемная система размещается на расстоянии порядка 40 мм от источника индуцированного сигнала флуоресценции. Управление параметрами приемной системы осуществлялось с помощью процессорной платы ITX-N29. В качестве иллюминаторов установлены кварцевые стекла толщиной 12 мм. В случае интеграции на подводный аппарат Rovbuilder 660D управление комплексом будет осуществляться по каналу Ethernet.

С помощью собранного лабораторного комплекса были проведены измерения спектров индуцированной флуоресценции растворов широко встречающихся на практике образцов легких сортов топлива типа DMA, DMZ и тяжелых типов судового топлива RMB30, RME180. Их характеристики представлены в таблицах 1-4.

Таблица 1

Характеристики топлива DMA		
№	Наименование показателя	Результат анализа
1	Кинематическая вязкость при 20 °С	4,282
2	Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	836
3	Содержание серы, %	0,255
4	Содержание воды, %	Следы
5	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С	73
6	Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С	85
7	Температура застывания °С	-40

Таблица 2

Характеристики топлива DMZ		
№	Наименование показателя	Результат анализа
1	Кинематическая вязкость при 20 °С	7,101
2	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С	86
3	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	868
4	Массовая доля серы, %	0,484
5	Массовая доля воды, %	следы
6	Температура застывания °С	-40

Таблица 3

Характеристики топлива RMB 30		
№	Наименование показателя	Результат анализа
1	Кинематическая вязкость при 50 °С	31.9
2	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С	92
3	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	976.4
4	Массовая доля серы, %	0.626
5	Массовая доля воды, %	0.3
6	Температура застывания °С	-13
7	Стабильность остаточных топлив	1.0

Таблица 4

Характеристики топлива RME 180		
№	Наименование показателя	Результат анализа
1	Кинематическая вязкость при 50 °С	112.1
2	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С	92
3	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	933.4
4	Массовая доля серы, %	1.05
5	Массовая доля воды, %	0.2
6	Температура застывания °С	+15
7	Зольность, %	0.254

Подготовка растворов производилась путем соединения исследуемого типа нефтепродукта с морской водой и последующим размешиванием пробы на магнитной мешалке в течение 24 часов. Взвешенное вещество, оставшееся после перемешивания в пробирке, удалялось с помощью фильтрации. Полученная концентрация пробы определялась с помощью метода ИК спектроскопии

с Фурье преобразованием. Меньшие концентрации получались путём разведения исходной концентрации с морской водой в различных пропорциях. Пример полученных спектральных характеристик для растворов топлива RMB 30 представлен на рисунке 2.

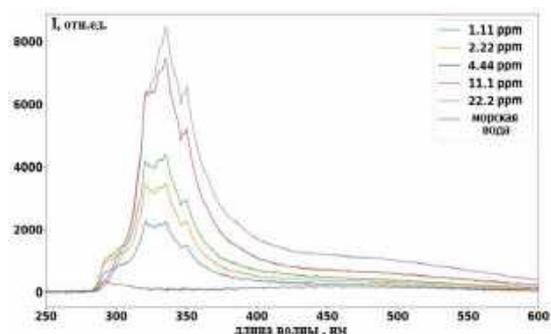


Рис. 2 Спектры флуоресценции морской воды и растворов топлива RMB 30 при возбуждении ультрафиолетовым излучением на длине волны 278 нм

Для определения пределов обнаружения растворенных нефтепродуктов в морской воде по полученным спектрам флуоресценции в качестве определяющего параметра была взята интегральная характеристика спектров флуоресценции в диапазоне 300-525 нм:

$$\alpha = \int_{300}^{525} (I(\lambda) - I_0(\lambda)) d\lambda \quad (1)$$

где  $I(\lambda)$  – спектральная интенсивность сигнала флуоресценции растворенного нефтепродукта;  $I_0(\lambda)$  – спектральная интенсивность сигнала флуоресценции чистой морской воды.

Для определения пределов обнаружимых концентраций по полученным интегральным параметрам строились калибровочные кривые, у которых определялся коэффициент наклона кривой  $S$ . Пределы концентрации рассчитывались по формуле [6]:

$$LoD = 3\sigma/S \quad (2)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение фонового сигнала, принятого за сигнал флуоресценции чистой морской воды.

Пример полученной калибровочной кривой для растворов RMB30 представлен на рисунке 3.

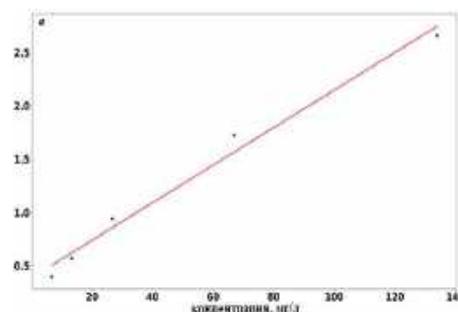


Рис. 3. Калибровочная зависимость для растворов судового топлива DMZ

На основании калибровочных зависимостей были посчитаны пределы обнаружения LoD для исследуемых образцов растворов нефтепродуктов: DMA- 0.1 ppm, DMZ- 1.1 ppm, RMB30- 0.3 ppm, RME180- 0.2 ppm.

Для автоматического распознавания исследуемых сортов нефтепродуктов был разработан программный компонент с использованием методов машинного обучения. В качестве средства реализации был выбран язык программирования Python с библиотеками scikit-learn и NumPy. Для этого использовались полученные в ходе лабораторных экспериментов спектры сортов нефтепродуктов в качестве определения признаков описаний. Спектры предварительно обрабатывались, нормировались, приводились к единому формату [7]. Далее массивы спектров исследуемых типов нефтепродуктов использовались при составлении датасетов для извлечения из них признаков. Сформированная из признаков описаний матрица данных использовалась для обучения метода Linear Support Vector Classification (LinearSVC) [8]. В результате полученная модель была апробирована для определения типа раствора нефтепродукта на основе 30 тестовых спектральных характеристик, полученных в лабораторных условиях и не использовавшихся в процессе обучения. Точность классификации для всех исследуемых образцов составила свыше 85 %. Пример работы созданной модели представлен на рисунке 4.

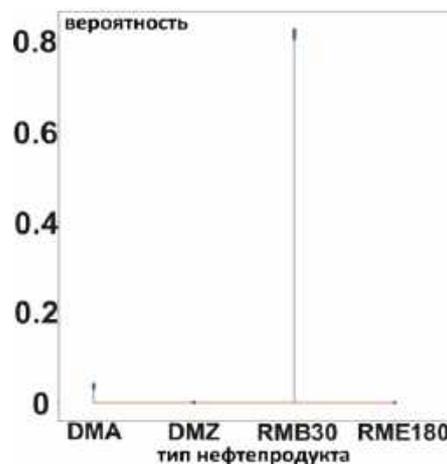


Рис. 4. Распределение вероятности соответствия случайно выбранных 30 спектров растворов с различной концентрацией топлива RMB30 рассмотренным сортам растворенных нефтепродуктов в морской воде при использовании алгоритма LinearSVC

#### Заключение

Согласно полученным результатам предлагаемый лабораторный вариант подводного спектрометра по идентификации нефтяных загрязнений на основе метода индуцированной флуоресценции позволит обеспечить контроль критерия чистых вод по международной конвенции МАРПОЛ, согласно которой допустимый предел концентрации растворённых нефтепродуктов не должен превышать 15 ppm [9]. Разработанный программный компонент с элементами искусственного интеллекта позволяет производить типовую классификацию растворов исследованных в работе сортов нефтепродуктов с вероятностью выше 80 %. На основании полученных результатов можно заключить, что данный аппаратно-программный комплекс применим для практического мониторинга нефтяных загрязнений в подводной среде.

#### Литература

1. Платонов А. П., Платонов В. А. Основы общей и инженерной экологии //Ростов-на-Дону: Феникс. – 2002. – Т.3
2. Frank, U. A review of fluorescence spectroscopic methods for oil spill source identification. Toxicol. Environ. Chem. Rev. 1978, 2, 163–185.
3. Utkin, A.B.; Lavrov, A.; Vilar, R. Evaluation of oil spills by laser induced fluorescence spectra. In International Conference on Lasers, Applications, and Technologies, Kazan, Russian Federation, 23–27 August 2010; Vladislav, P., Gérard, M., Aleksei, M.Z., Eds. International Society for Optics and Photonics: Bellingham, WA, USA, 2011; Volume 7994, p. 799415.
4. Fingas, M.; Brown, C.E. A review of oil spill remote sensing. Sensors 2018, 18, 91.
5. Подводный аппарат РБ-600: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rovbuilder.com/rb-600/> (Дата обращения: 19.01.2022).
6. Long G. L., Winefordner J. D. Limit of detection. A closer look at the IUPAC definition //Analytical chemistry. – 1983. – Т. 55. – № 7. – С. 712A-724A.
7. Bukin O., Proshchenko D., Alexey C., Korovetskiy D., Bukin I., Yurchik V., Postnova I.V., Nadezhkin, A. New solutions of laser-induced fluorescence for oil pollution monitoring at sea //Photonics. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. – Т. 7. – №. 2. – С. 36.
8. Bloice M. D., Holzinger A. A tutorial on machine learning and data science tools with python //Machine Learning for Health Informatics. – 2016. – С. 435-480.
9. Julian, M. MARPOL 73/78: The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships. Marit. Stud. 2000, 2000, 16–23.

### References

1. Platonov A. P., Platonov V. A. Fundamentals of general and engineering ecology // Rostov-on-Don: Phoenix. – 2002. –V.3.
2. Frank, U. A review of fluorescence spectroscopic methods for oil spill source identification. Toxicol. Environ. Chem. Rev. 1978, 2, 163–185.
3. Utkin, A.B.; Lavrov, A.; Vilar, R. Evaluation of oil spills by laser induced fluorescence spectra. In International Conference on Lasers, Applications, and Technologies, Kazan, Russian Federation, 23–27 August 2010; Vladislav, P., Gérard, M., Aleksei, M.Z., Eds. International Society for Optics and Photonics: Bellingham, WA, USA, 2011; Volume 7994, p. 799415.
4. Fingas, M.; Brown, C.E. A review of oil spill remote sensing. Sensors 2018, 18, 91.
5. Underwater vehicle RB-600: [Electronic resource]. URL: <https://www.rovbuilder.com/rb-600/> (Date of access: 01/19/2022).
6. Long G. L., Winefordner J. D. Limit of detection. A closer look at the IUPAC definition //Analytical chemistry. – 1983. – Т. 55. – №. 7. – С. 712A-724A.
7. Bukin O., Proshenko D., Alexey C., Korovetskiy D., Bukin I., Yurchik V., Postnova I.V., Nadezhkin, A. New solutions of laser-induced fluorescence for oil pollution monitoring at sea //Photonics. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. – Т. 7. – №. 2. – С. 36.
8. Bloice M. D., Holzinger A. A tutorial on machine learning and data science tools with python //Machine Learning for Health Informatics. – 2016. – С. 435-480.
9. Julian, M. MARPOL 73/78: The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships. Marit. Stud. 2000, 2000, 16–23.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Дмитрий Юрьевич Проценко**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией морской робототехники научно-инновационного комплекса “Морской технопарк”, Морской государственный университет им. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; старший научный сотрудник лаборатории аналитической лазерной спектроскопии, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, e-mail: [dima.prsk@mail.ru](mailto:dima.prsk@mail.ru)

**Dmitriy Yu. Proshenko**, Ph.D. (Phys & Math), Head of the Laboratory of Marine Robotics of the Scientific and Innovative Complex "Marine Technopark", Maritime State University. G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a; Senior Researcher, Laboratory of Analytical Laser Spectroscopy, Far Eastern Federal University, 690922, Primorsky Krai, Russky Island, Saperny Peninsula, Ayaks Settlement, 10, e-mail: [dima.prsk@mail.ru](mailto:dima.prsk@mail.ru)

**Олег Алексеевич Букин**, доктор физико-математических наук, профессор, директор научно-инновационного комплекса “Морской технопарк”, Морской государственный университет им. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; ведущий научный сотрудник лаборатории аналитической лазерной спектроскопии, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, e-mail: [o\\_bukin@mail.ru](mailto:o_bukin@mail.ru)

**Oleg A. Bukin**, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Director of the Research and Innovation Complex "Marine Technopark", Maritime State University. G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a; Leading Researcher, Laboratory of Analytical Laser Spectroscopy, Far Eastern Federal University, 690922, Primorsky Krai, Russky Island, Saperny Peninsula, Ayaks Settlement, 10, e-mail: [o\\_bukin@mail.ru](mailto:o_bukin@mail.ru)

**Алексей Анатольевич Чехленок**, младший научный сотрудник лаборатории морской робототехники научно-инновационного комплекса “Морской технопарк”, Морской государственный университет им. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; инженер-исследователь лаборатории аналитической лазерной спектроскопии, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, e-mail: [dima.prsk@mail.ru](mailto:dima.prsk@mail.ru)

**Aleksey A. Chekhlenok**, Junior Researcher, Laboratory of Marine Robotics, Research and Innovation Complex "Marine Technopark", Maritime State University named after G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a; Research Engineer, Laboratory of Analytical Laser Spectroscopy, Far Eastern Federal University, 690922, Primorsky Krai, Russky Island, Saperny Peninsula, Ayaks Settlement, 10, e-mail: [dima.prsk@mail.ru](mailto:dima.prsk@mail.ru)

**Илья Олегович Букин**, младший научный сотрудник лаборатории морской робототехники научно-инновационного комплекса “Морской технопарк”, Морской государственный университет им. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

**Ilya O. Bukin**, Junior Researcher, Laboratory of Marine Robotics, Research and Innovation Complex "Marine Technopark", Maritime State University. G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a

**Денис Андреевич Коровецкий**, младший научный сотрудник лаборатории морской робототехники научно-инновационного комплекса "Морской технопарк", Морской государственный университет им. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

**Сергей Сергеевич Голик**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией аналитической лазерной спектроскопии, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, e-mail: golik\_s@mail.ru

**Ирина Васильевна Соколова**, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, Морской государственный университет им. Г.И. Невельского, Россия, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: isokolova@msun.ru

**Андрей Вениаминович Надежкин**, доктор технических наук, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, Морской государственный университет им. Г.И. Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: Nadezkin@msun.ru

**Denis A. Korovetsky**, Junior Researcher, Laboratory of Marine Robotics, Research and Innovation Complex "Marine Technopark", Maritime State University. G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a

**Sergey S. Golik**, Ph.D. (Phys & Math), Head of the Laboratory of Analytical Laser Spectroscopy, Far Eastern Federal University, 690922, Primorsky Krai, Russky Island, Saperny Peninsula, Ayaks Settlement, 10, e-mail: golik\_s@mail.ru

**Irina V. Sokolova**, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Marine Internal Combustion Engines, Maritime State University named after G.I. Nevelskoy, Russia, 690059 Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a, e-mail: isokolova@msun.ru

**Andrey V. Nadezhkin**, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Marine Internal Combustion Engines, Maritime State University. G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a, e-mail: Nadezkin@msun.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.08.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 03.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.07.2022.

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 004.932.2: 004. 93' 1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.024>

### Принцип распознавания объектов проблемной среды в процессе планирования поведения автономной интеллектуальной мобильной системы

Мелехин В.Б.<sup>1</sup> pashka1602@rambler.ru, Хачумов М.В.<sup>2,3,4</sup> khmike@inbox.ru

<sup>1</sup>Дагестанский государственный технический университет, <sup>2</sup>Институт программных систем им. А.К.Айламазяна РАН, <sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, <sup>4</sup>Российский университет дружбы народов

**Аннотация.** Решается задача, связанная с организацией распознавания автономной интеллектуальной мобильной системой находящихся в проблемной среде отдельных объектов в реальном времени с целью повышения эффективности планирования целенаправленного поведения в условиях неопределенности. Рассмотрена классификация, обеспечивающая возможность построения эталонных моделей различных объектов проблемной среды в виде гиперграфа, отражающего структуру визуального изображения в виде связанных между собой их структурных элементов с учетом семантического содержания характеризующих данные элементы признаков.

Разработан оригинальный метод автоматического построения модели воспринимаемых в проблемной среде объектов в виде гиперграфа “видимости”, позволяющего на основе его сравнения с гиперграфом эталонного описания их визуального изображения, распознавать данные объекты автономной интеллектуальной мобильной системой по мере необходимости в процессе планирования поведения.

Предложено решающее правило, основанное на сравнении между собой помеченных гиперграфов, соответствующих изображению воспринимаемых интеллектуальной системой в проблемной среде объектов и эталонного их описания в ее модели представления знаний. Найден порядок сложности инструментальных средств реализации данного решающего правила, что позволяет ориентировочно оценить производительность бортовой ЭВМ, необходимую для эффективного распознавания автономной интеллектуальной системой находящихся в проблемной среде объектов.

**Ключевые слова:** автономная интеллектуальная мобильная система, проблемная среда, распознавание объектов, структурные элементы, признаки, гиперграф “видимости”.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056>

**Для цитирования:** Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Принцип распознавания объектов проблемной среды в процессе планирования поведения автономной интеллектуальной мобильной системы. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 181—187.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.024>

### The principle of object recognition in a problem environment in the process of planning the behavior of an autonomous intelligent mobile system

Vladimir B. Melekhin<sup>1</sup> pashka1602@rambltr.ru, Mikhail V. Khachumov<sup>2,3,4</sup> khmike@inbox.ru

<sup>1</sup>Dagestan State Technical University, Russian Federation, <sup>2</sup>Program Systems Institute, A.K. Ailamazyan RAS, Russian Federation, <sup>3</sup>Federal Research Center "Informatics and Controls" RAS, Russian Federation

<sup>4</sup>Peoples' Friendship University of Russia, Russian Federation

**Abstract.** The problem associated with the organization of real-time recognition of individual objects in a problematic environment by an autonomous intelligent mobile system is solved in order to increase the efficiency of planning purposeful behavior under conditions of uncertainty. A classification is considered that provides the possibility of constructing reference models of various objects of the problem environment in the form of a hyper graph that reflects the structure of a visual image in the form of their interconnected structural elements, taking into account the semantic content of the features characterizing these elements.

An original method has been developed for automatically constructing a model of objects perceived in a problematic environment in the form of a “visibility” hyper graph, which allows, based on its comparison with the hypergraph of a reference description of their visual image, to recognize these objects by an autonomous intelligent mobile system as necessary in the process of behavior planning.

A decision rule is proposed based on a comparison of labeled hyper graphs corresponding to the image of objects perceived by the intellectual system in a problematic environment and their reference description in its knowledge

representation model. The order of complexity of the tools for implementing this decision rule is found, which makes it possible to approximately estimate the approximate performance of the on-board computer necessary for the effective recognition of objects in a problematic environment by an autonomous intelligent system.

**Key words:** autonomous intelligent mobile system, problematic environment, object recognition, structural elements, features, "visibility" hyper graph.

**Financial Support:** The study was financially supported by the Russian Science Foundation under project No. 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056>

**For citation:** Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov, The principle of object recognition in a problem environment in the process of planning the behavior of an autonomous intelligent mobile system, Marine intellectual technologies, 2022. № 3 part 1. P. 181—187.

## Введение

В процессе решения различных сложных задач, связанных с автоматическим планированием целенаправленного поведения автономной интеллектуальной мобильной системы (далее просто интеллектуальной системы (ИС)) в априори неописанной проблемной среде (ПС), актуальной является проблема распознавания находящихся в среде объектов. Эффективное решение данной сложной проблемы при активном взаимодействии ИС с ПС позволяет реализовать, например, следующие важные подзадачи поведения, связанные с достижением стоящей перед интеллектуальной системой цели [1]:

– выявить в априори неописанной проблемной среде заданные объекты;

– определить результативные действия для манипулирования различными объектами ПС с целью перевода текущей ситуации проблемной среды в заданную целевую ситуацию;

– избежать встречи и столкновения в процессе целенаправленного поведения с опасными объектами проблемной среды и т.д.

Актуальная необходимость эффективного решения данной проблемы связана с тем, что современные инструментальные средства распознавания [2–8] не позволяют в реальном времени автоматически строить в формальном структурированном представлении зрительные образы находящихся в ПС объектов, позволяющие выполнить их распознавание на основе сравнения с эталонными их описаниями, хранящимися в модели представления знаний ИС. Кроме того, в известных методах распознавания образов практически не участвует семантическое содержание различных признаков, по которым выполняется идентификация изображений рассматриваемых объектов ПС. Это, в свою очередь, приводит к нестабильному распознаванию образов в условиях влияния различного вида помех.

В настоящей статье предлагается одна из попыток эффективного решения данной проблемы, позволяющая обойти отмеченные выше недостатки известных методов распознавания образов в системах технического зрения ИС.

### 1. Постановка задачи

Для распознавания воспринимаемых в ПС объектов

$O = \{o_{i_1}\}, i_1 = \overline{1, n_1}$  и связанных с ними абстрактных образов в процессе планирования поведения ИС и вывода решений целесообразно упорядочить хранение структурированного описания их эталонных образов в модели представления знаний интеллектуальной системы с учетом семантического

содержания участвующих в этом процессе признаков. Для этой цели можно использовать следующую классификацию конкретных и абстрактных объектов ПС, построенную на основе родовидовых отношений [9]. Согласно данной классификации все отдельные объекты ПС  $o_{i_1} \in O$  являются индивидуумами, которые относятся к определенному виду, роду, классу, а также определяются соответствующими им понятиями и признаками. Например, конкретный воробей относится к виду “воробьи”, роду “птицы” и классу “живые существа”.

Таким образом, для структурированного описания различных объектов ПС и их эталонных образов, хранящихся в памяти ИС, целесообразно использовать следующую их классификацию.

1. Множество индивидуумов (конкретных объектов)

ПС  $O^* = \{o_{i_2}(X_{i_2}), i_2 = \overline{1, n_2}\}$ , где  $X_{i_2}$  – множество не меняющихся во времени базовых или основных признаков, характеризующих  $i_2$  индивидуум.

2. Множество  $\{o_{i_3}(X_{i_3}), i_3 = \overline{1, n_3}\}$  понятий “вид”

объектов. Каждому понятию вид соответствует  $j_1$  подмножество индивидуумов  $o_{i_2}(X_{i_2}(j_1))$  по характерному только для него пересечению

$X_{i_3} = \bigcap_{j_1=1}^{m_1} X_{i_2}(j_1)$  определяющих их базовых

признаков  $X_{i_2}(j_1)$ . Иначе говоря, произвольный индивидуум ПС  $o_{i_2}(X_{i_2})$  относится к  $i_3$  виду и определяется соответствующим ему понятием, если для него выполняется условие  $X_{i_3} \subset X_{i_2}$ .

3. Множество  $\{o_{i_4}(X_{i_4}), i_4 = \overline{1, n_4}\}$  понятий “род”

объектов. Каждый  $j_2$  род объектов определяется такими их видами  $o_{i_3}(X_{i_3}(j_2))$ , которым соответствует характерное только для него

пересечение базовых признаков  $X_{i_4} = \bigcap_{j_2=1}^{m_2} X_{i_3}(j_2)$

. Следовательно, вид объектов  $o_{i_3}(X_{i_3})$  относится к  $o_{i_4}(X_{i_4})$  роду и определяется соответствующим

ему понятием, если для него справедливо условие  $X_{i_4} \subset X_{i_3}$ .

4. Множество понятий  $\{o_{i_5}(X_{i_5}), i_5 = \overline{1, n_5}\}$  “класс” объектов ПС. Определенные индивидуумы, относящиеся к различным понятиям “род”  $o_{i_3}(X_{i_3}(j_3))$ , образуют  $j_4$  класс объектов ПС, по характерному только для него пересечению их базовых признаков  $X_{i_4} = \bigcap_{j_3=1}^{m_3} X_{i_3}(j_3)$ .

Таким образом, для каждого  $i_2$  индивидуума  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O^*$ , относящегося к  $j_4$  классу объектов, справедливым является условие  $X_{i_5} \subset X_{i_4} \subset X_{i_3} \subset X_{i_2}$ . Кроме того, он определяется понятиями, соответствующими “виду”, “роду” и “классу”, к которым относится. При этом множество базовых признаков

$X_{i_2} = \{x_{i_6}(Y_{i_6}), i_6 = \overline{1, n_6}\}$  различных индивидуумов ПС разбивается на следующие подмножества:

– признаки  $x_{i_2}^1(Y_{i_2}^1) \in X_{i_2}^1, X_{i_2}^1 \subset X_{i_2}$ , определяющие структурные элементы или составные части индивидуумов, которые в свою очередь могут быть частями составных частей и их неделимыми частями. Здесь  $Y_{i_1}^1$  – множество количественных оценок характеристик, которые определяют соответствующий базовый признак  $x_{i_1}^1(Y_{i_1}^1)$  индивидуума  $o_{i_2}(X_{i_2})$ , например, его размеры;

– признаки  $x_{i_2}^2(Y_{i_2}^2) \in X_{i_2}^2, X_{i_2}^2 \subset X_{i_2}$ , характеризующие вид поверхности индивидуумов и их структурных элементов, например, плоский, выпуклый, вогнутый, волнистый и т. д., где  $Y_{i_1}^2$  – множество количественных оценок характеристик базового признака  $x_{i_1}^2(Y_{i_1}^2)$ , определяющего вид поверхности индивидуума  $o_{i_2}(X_{i_2})$  или его составной части  $x_{i_1}^1(Y_{i_1}^1)$ , например, радиус и форма выпуклости поверхности и т.п.;

– признаки  $x_{i_2}^3(Y_{i_2}^3) \in X_{i_2}^3, X_{i_2}^3 \subset X_{i_2}$ , определяющие вещество, из которого состоит индивидуум и его структурные элементы, например, металл, пластик, вода и т. п., где  $Y_{i_1}^3$  – множество количественных характеристик, описывающих вещество  $x_{i_1}^3(Y_{i_1}^3)$ , из которого состоит индивидуум  $o_{i_2}(X_{i_2})$  или его составная часть  $x_{i_1}^1(Y_{i_1}^1)$ , например, толщина, упругость и т.д.;

– признаки  $x_{i_2}^4(Y_{i_2}^4) \in X_{i_2}^4, X_{i_2}^4 \subset X_{i_2}$ , характеризующие геометрическую форму индивидуума  $o_{i_2}(X_{i_2})$  и его структурных элементов  $x_{i_1}^1(Y_{i_1}^1)$ , например, квадратная, круглая, овальная форма и т.д., где  $Y_{i_2}^4$  – множество количественных характеристик определяющих геометрическую форму индивидуума или его составных частей, например, длина стороны квадрата, радиус окружности и т.п.;

– признаки  $x_{i_2}^5(Y_{i_2}^5) \in X_{i_2}^5, X_{i_2}^5 \subset X_{i_2}$ , характеризующие цвет индивидуума или его составных частей, где  $Y_{i_2}^5$  – количественные характеристики, определяющие соответствующий им базовый признак  $x_{i_2}^5(Y_{i_2}^5)$ , например, длина волны и т.д.

Приведенная выше классификация объектов ПС позволяет построить формальное структурированное представление эталонного описания индивидуумов в виде графа “видимости” в модели знаний АИМС, представляющее собой помеченный гиперграф  $G_{i_2}^* = (V_{i_2}^*, E_{i_2}^*)$ , где  $V_{i_2}^*$ ,  $E_{i_2}^*$  – множество вершин и ребер гиперграфа  $G_{i_2}^*$ .

Каждая вершина  $v_{j_4} \in V_{i_2}^*$  гиперграфа  $G_{i_2}^*$  помечается парой  $\langle G_{i_2}^{i_6}, v_{i_6}^0 \rangle$ , где  $G_{i_2}^{i_6} = (V_{i_2}^{i_6}, E_{i_2}^{i_6})$

– граф, описывающий  $i_6$  базовый признак  $x_{i_6}(Y_{i_6})$  индивидуума, вершины которого  $V_{i_2}^{i_6}$  определяются

количественными оценками, характеризующими его признаки. Ребра данного графа помечаются семантическими отношениями [10], которые сложились между данными признаками в структуре соответствующего базового признака  $x_{i_6}(Y_{i_6})$ ;  $v_{i_6}^0$  – изолированная вершина графа  $G_{i_2}^{i_6}$ , помеченная идентификатором или понятием, которым определяется базовый признак  $x_{i_6}(Y_{i_6})$  индивидуума  $o_{i_2}(X_{i_2})$ .

Следовательно, для распознавания ИС наблюдаемых в ПС объектов  $o_{i_1} \in O$  требуется разработать процедуры, позволяющие для их трехмерного изображения автоматически синтезировать граф “видимости” в виде гиперграфа  $G_{i_1} = (V_{i_1}, E_{i_2})$ . При этом, каждый автоматически генерируемый гиперграф  $G_{i_1}$  должен иметь структуру идентичную структуре и содержанию пометок вершин и ребер с эталонным для соответствующих ему индивидуумов  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O^*$ , представленных графами видимости  $G_{i_2}^* = (V_{i_2}^*, E_{i_2}^*)$ .

## 2. Принцип автоматического построения графа видимости для наблюдаемых в проблемной среде объектов

Таким образом, для распознавания ИС отдельных объектов  $o_{i_1} \in O$ , присутствующих в ПС, требуется выполнить формальное описание их визуального изображения в виде графа “видимости”  $G_{i_1} = (V_{i_1}, E_{i_1})$ . Затем, используя данный граф “видимости”  $G_{i_1}$ , установить изоморфный ему с точностью до равенства пометок структурно эквивалентных вершин и ребер эталонный граф зрительного образа  $G_{i_2}^* = (V_{i_2}^*, E_{i_2}^*)$ , хранящийся в модели представления знаний ИС.

В общем случае решение задачи автоматического синтеза графа “видимости”  $G_{i_1}$  состоит из следующих трех основных этапов:

– расчленения воспринимаемого в ПС объекта  $o_{i_1} \in O$  на его структурные элементы или составные части  $x_{i_1}^1(Y_{i_1}^1) \in X_{i_1}^1$  с требуемым уровнем детализации, например, до неделимых частей;

– формирования для каждой полученного таким образом структурного элемента  $x_{i_1}^1(Y_{i_1}^1) \in X_{i_1}^1$  объекта  $o_{i_1} \in O$  графа  $G_{i_1}^{i_6} = (V_{i_1}^{i_6}, E_{i_1}^{i_6})$ , описывающего его основные  $i_6$  признаки и соответствующую вершину гиперграфа “видимости”  $G_{i_1} = (V_{i_1}, E_{i_1})$ ;

– построения гиперграфа “видимости”  $G_{i_1} = (V_{i_1}, E_{i_1})$ , путем реализации связей между смежными вершинами  $G_{i_1}^{i_6} = (V_{i_1}^{i_6}, E_{i_1}^{i_6})$  в виде ребер, которые распределяются отношениями характеризующими расположение относительно друг друга соответствующих этим вершинам структурных элементов воспринимаемого в ПС объекта.

Отсюда, в общем случае описание процедур автоматической генерации графов видимости  $G_{i_1} = (V_{i_1}, E_{i_1})$  для воспринимаемых в ПС объектов  $o_{i_1} \in O$  в подсистеме восприятия ИС, можно представить следующим образом.

1. Определить в качестве точки отчета расчленения наблюдаемого в ПС объекта  $o_{i_1} \in O$  на его структурные элементы верхнюю точку, определяющую его расположение в проблемной среде в принятой системе координат. Приступить к расчленению объекта  $o_{i_1} \in O$  двигаясь по его визуальному изображению слева направо, сверху вниз, начиная с составной части, которой принадлежит выбранная точка отчета.

2. Расчленить наблюдаемый в ПС объект  $o_{i_1} \in O$  на структурные элементы  $x_{i_1}^1(Y_{i_1}^1) \in X_{i_1}^1$  по границам резкого перехода в трехмерном его визуальном изображении в заданной системе координат от одной поверхности к другой, отличающейся от нее

поверхности воспринимаемого объекта, которые принимаются за его составные части.

3. Присвоить каждому вырезанному структурному элементу объекта  $o_{i_1} \in O$  порядковый номер  $k$ , определяемый номером шага, на котором он был получен. Сформировать пары  $\langle k_i, k_j \rangle$  из номеров  $k$  для всех соседних структурных элементов изображения воспринимаемого в ПС объекта.

4. Для каждого вырезанного структурного элемента на основе данных, хранящихся в модели представления знаний подсистемы восприятия, определить следующие его основные характеристики: вид поверхности  $x_{i_1}^2(Y_{i_1}^2) \in X_{i_1}^2$ , контур ее геометрической формы  $x_{i_1}^4(Y_{i_1}^4) \in X_{i_1}^4$ , габаритные размеры  $x_{i_1}^5(Y_{i_1}^5) \in X_{i_1}^5$  и цвет  $x_{i_1}^6(Y_{i_1}^6) \in X_{i_1}^6$ .

При этом если две непосредственно связанные между собой вырезанные части объекта имеют абсолютно одни и те же оценки определяющих их характеристик, то принимается решение, что они относятся к его одному и тому же структурному элементу.

5. Для каждого  $i_6$  вырезанного структурного элемента рассматриваемого объекта построить описывающей его граф  $G_{i_1}^{i_6} = (v_{i_1}^{i_6}, V_{i_1}^{i_6}, E_{i_1}^{i_6})$ , где  $v_{i_1}^{i_6}$  – базовая вершина, помеченная номером вырезанной из объекта соответствующей составной части. Остальные вершины помечаются признаками структурного элемента наблюдаемого в ПС объекта  $o_{i_1} \in O$ , а ребра – отношениями которые определяют вид связи между рассматриваемой составной частью объекта и ее признаками, например, “имеет форму” и т.п. В результате получается звездоподобный граф, центральная вершина которого определяется базовой вершиной  $v_{i_1}^{i_6}$ , из которой исходят лучи (ребра) к вершинам, помеченным признаками соответствующего структурного элемента объекта  $o_{i_1} \in O$ .

6. Используя пары  $\langle k_i, k_j \rangle$ , построить граф “видимости”  $G_{i_1} = (V_{i_1}, E_{i_1})$  для воспринимаемого в ПС объекта  $o_{i_1} \in O$ . Для этого следует связать между собой ребрами вершины  $v_{i_1}^{i_6}$  во всех парах  $\langle k_i, k_j \rangle$  его смежных структурных элементов.

Пометить полученные таким образом ребра отношением, которое определяет расположение вырезанных составных частей в структуре объекта, например, расположена выше, слева, ниже и справа от связанного с ней структурного элемента.

Следует отметить, что закладываемые в модель представления знаний ИС эталонные описания визуальных изображений  $G_{i_2}^* = (V_{i_2}^*, E_{i_2}^*)$  индивидуумов  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O^*$  строятся таким же

способом, как и графы “видимости”  $G_{i_1} = (V_{i_1}, E_{i_1})$  для соответствующих им объектов ПС  $o_{i_1} \in O$ . Это позволяет определить идентичные по структуре и содержанию пометок графы видимости  $G_{i_1} = (V_{i_1}, E_{i_1})$  и  $G_{i_2}^* = (V_{i_2}^*, E_{i_2}^*)$  путем их сравнения между собой.

При этом принимается решение о том, что объект ПС  $o_{i_1} \in O$  является индивидуумом  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O^*$ , если для соответствующих им гиперграфов выполняется следующее условие: “сравниваемые между собой гиперграфы являются структурно эквивалентными, т.е. изоморфными с точностью до равенства пометок одноименных в них вершин и ребер”. Иначе говоря, если для данных гиперграфов справедливы следующие условия:

- для каждой вершины  $v_{j_4} \in V_{i_2}^*$  гиперграфа  $G_{i_2}^*$  имеется одинаково помеченная с ней структурно эквивалентная вершина  $v_{j_6} \in V_{i_1}$  в графе  $G_{i_1}$ ;
- для каждого ребра  $e_{j_5} \in E_{i_2}^*$  гиперграфа  $G_{i_2}^*$  имеется одинаково помеченное с ним структурно эквивалентное ребро  $e_{j_7} \in E_{i_1}$  в графе  $G_{i_1}$ .

Учитывая, что в гиперграфах  $G_{i_1}$  и  $G_{i_2}^*$  одноименные гипервершины  $v_{j_4} \in V_{i_2}^*$  и  $v_{j_6} \in V_{i_1}$  одинаково пронумерованы, для повышения эффективности поиска необходимого для вывода решений эталонного образа в модели представления знаний ИС их множество по количеству вершин разбивается на классы. Это позволяет по номеру последней вершины в гиперграфе  $G_{i_1}$  выбирать на первом шаге поиска соответствующий ему класс эталонных гиперграфов.

Затем, на втором шаге между собой сравниваются пометки первой гипервершины гиперграфа  $G_{i_1}$  с первыми вершинами в найденных на первом шаге поиска эталонных гиперграфах  $G_{i_2}^*$ . Все гиперграфы  $G_{i_2}^*$ , у которых содержание пометок первых вершин не совпадает с пометками первой вершины в гиперграфе  $G_{i_1}$ , отсеиваются, и осуществляется переход на следующий шаг поиска эталонного образа.

На третьем шаге выполняется сравнение между собой пометок второй вершины гиперграфа  $G_{i_1}$  со вторыми вершинами гиперграфов  $G_{i_2}^*$ , оставшимися после отсеивания на предыдущем шаге поиска, и т.д. Данный процесс сравнения между собой гиперграфа  $G_{i_1}$ , определяющего визуальный образ анализируемого в ПС объекта  $o_{i_1} \in O$ , продолжается до тех пор, пока не будет выявлен гиперграф  $G_{i_2}^*$ , соответствующий индивидууму к которому относится данный объект, или не будет принято решение о том, что для рассматриваемого в ПС объекта эталонное описание его визуального

образа в модели представления знаний ИС отсутствует.

Введем понятие функциональной сложности  $\beta$  процесса поиска эталонного гиперграфа  $G_{i_2}^*$  идентичного гиперграфу  $G_{i_1}$ , определяющего визуальный образ анализируемого в ПС объекта  $o_{i_1} \in O$ , которая определяется количеством сравниваемых в них пометок структурно эквивалентных вершин и ребер.

**Утверждение.** В общем случае функциональная сложность  $\beta$  определяется следующим выражением:

$$\beta = n_{i_6}^2(m) + \sum_{j_8=1}^m (n - k_{j_8-1})n_{i_6}^2(j_8),$$

где  $n_{i_6}^2(m)$  – количество вершин в графах  $G_{i_1}^{i_6}$  и  $G_{i_2}^{i_6}$ , определяющих признаки гипервершин, соответственно в оставшихся гиперграфах  $G_{i_1}$  и  $G_{i_2}^*$  на последнем шаге поиска;  $m$  – общее количество шагов поиска эталонного гиперграфа, соответствующего визуальному изображению анализируемого объекта ПС;  $n$  – количество сравниваемых между собой гиперграфов на первом шаге поиска;  $k_{j_8-1}$  – количество удаленных гиперграфов на  $j_8 - 1$  шаге поиска;  $n_{i_6}^2(j_8)$  – количество вершин в графах  $G_{i_1}^{i_6}(j_8)$  и  $G_{i_2}^{i_6}(j_8)$ , определяющих признаки гипервершин в сравниваемых между собой гиперграфах на текущем  $j_8$  шаге поиска.

**Доказательство.** Справедливость сформулированного утверждения вытекает из следующих соображений.

1. На каждом  $j_8$  шаге сопоставления гиперграфов вида  $G_{i_1}^{i_6}$  и  $G_{i_2}^{i_6}$  сравниваются между собой помеченные графы  $G_{i_1}^{i_6}(j_8)$  и  $G_{i_2}^{i_6}(j_8)$ . Следовательно, количество сравниваемых между собой в этом случае пометок структурно эквивалентных в них вершин и ребер не может превышать величины, равной  $n_{i_6}^2(j_8)$ .

2. На каждом  $j_8 - 1$  шаге поиска удаляются гиперграфы  $G_{i_2}^*$ , не перспективные с точки зрения распознавания визуальной модели анализируемого в ПС объекта, т.е. их количество на  $j_8$  сокращается. Следовательно, на каждом  $j_8$  шаге поиска количество сравниваемых между собой пометок структурно эквивалентных вершин и ребер в гиперграфах  $G_{i_1}$  и  $G_{i_2}^*$  снижается и определяется величиной, равной  $(n - k_{j_8-1})n_{i_6}^2(j_8)$ . Таким образом, за  $m$  шагов поиска,

количество выполненных таким образом сравнений не может превышать величины, равной

$$\sum_{j_8=1}^m (n - k_{j_8-1}) n_{i_6}^2(j_8).$$

3. На последнем шаге поиска практически сравниваются между собой помеченные графы  $G_{i_1}^{i_6}$  и  $G_{i_2}^{i_6}$  двух оставшихся гиперграфов  $G_{i_1}$  и  $G_{i_2}^*$ , соответственно определяющих визуальную модель анализируемого объекта ПС и его эталонное описание, хранящееся в модели представления знаний АИМС. Следовательно, количество выполненных на данном шаге сравнений между собой пометок структурно эквивалентных вершин и ребер данных графов не может превышать величины, равной  $n_{i_6}^2(m)$ .

4. Из пп. 1-3 с очевидностью следует справедливость утверждения.

Следует отметить, что полученная оценка сложности  $\beta$  позволяет ориентировочно определить производительность бортовой ЭВМ, имеющей, как правило, ограниченные вычислительные ресурсы, которая требуется для эффективной реализации предложенного решающего правила позволяющего ИС распознавать находящиеся в ПС объекты в процессе планирования целенаправленной деятельности в условиях неопределенности.

Необходимо также отметить, что в модели представления знаний ИС целесообразно хранить дополнительные сведения об индивидуумах  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O^*$ , например, в качестве какого

инструмента интеллектуальная система может использовать соответствующие ему объекты  $o_{i_1} \in O$ , находящиеся в ПС. Для этой цели, на основе каждого гиперграфа  $G_{i_2}^*$ , строится продукционная модель следующего вида  $G_{i_2}^* \rightarrow S(o_{i_2}(X_2))$ , где  $S(o_{i_2}(X_2))$  – структурированное описание известных интеллектуальной системе дополнительных сведений об индивидууме  $o_{i_2}(X_2) \in O$ .

### Заключение

Резюмируя вышеизложенное, можно сформулировать следующие основные выводы. Рассмотренная классификация объектов ПС позволяет построить формальную эталонную модель данных объектов с учетом семантического содержания характеризующих признаков и на этой основе организовать их эффективное распознавание в процессе планирования целенаправленной деятельности ИС в условиях неопределенности.

Разработанный принцип автоматического синтеза графа “видимости” обеспечивает возможность ИС распознавать находящиеся в проблемной среде объекты и затем использовать эти объекты в процессе целенаправленной деятельности для достижения заданной цели поведения в условиях неопределенности.

Дальнейшее развитие предложенного принципа распознавания находящихся в ПС объектов связано с разработкой инструментальных средств, обеспечивающих его эффективное использование в условиях пространственных и другого вида помех.

### Литература

1. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения автономных интеллектуальных мобильных систем в условиях неопределенности: под ред. проф. В.М. Хачумова. СПб: Политехника, 2022. 276 с.
2. Путьатин Е.П. Обработка изображений в робототехнике М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
3. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
4. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 928 с.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1070 с.
6. Методы компьютерной обработки изображений: под ред. В.А. Соифера. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
7. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. Image processing, analysis, and machine vision. USA, California: Cole Publishing Company, 1999. 770 p.
8. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. London: Pearson, 2018. 1168 p.
9. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Структура представления декларативных знаний интегрального робота // Управляющие системы и машины. 1990. № 6. С. 75-83.
10. Stuart Russell, Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4 ed. Pearson, 2020. 1216 p.

### References

1. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Planirovanie povedeniya avtonomnyh intellektual'nyh mobil'nyh sistem v usloviyah neopredelennosti [Planning the behavior of autonomous intelligent mobile systems under uncertainty]: pod red. prof. V.M. Hachumova, SPb., izd. «Politekhnik», 2022, 276 s.
2. Putyatyn E.P. Obrabotka izobrazhenij v robototekhnike [Image processing in robotics], M., izd. «Mashinostroenie», 1990 320 s.
3. SHapiro L., Stokman Dzh. Komp'yuternoe zrenie [Computer vision]. M., izd. «BINOM. Laboratoriya znani», 2006, 752 s.
4. Forsajt D., Pons ZH. Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyj podhod [Computer vision. Modern approach ]. M., Izd. «Vil'yams», 2004, 928 s.
5. Gonsales R., Vuds R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij [Digital imaging ]. M., izd. «Tekhnosfera», 2005, 1070 s.
6. Metody komp'yuternoj obrabotki izobrazhenij [Methods of computer image processing]: pod red. V.A. Soifera. M., izd. «Fizmatlit», 2003, 784 s.
7. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. Image processing, analysis, and machine vision. USA, California, Cole Publishing Company, 1999, 770 s.

8. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing, London, Pearson, 2018, 1168 s.
9. Bershtejn L.S., Melekhin V.B. Struktura predstavleniya deklarativnyh znanij integral'nogo robota [The structure of the representation of the declarative knowledge of the integral robot]. Upravlyayushchie sistemy i mashiny [Control systems and machines], No. 6, pp. 75-83, 1990.
10. Stuart Russell, Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4 ed., Pearson, 2020, 1216 s.

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

**Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Российская Федерация, 367015. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70; E-mail: pashka1602@rambler.ru

**Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, 367015. Republic of Dagestan, Makhachkala, pr. Imam Shamilya, 70. E-mail: pashka1602@rambler.ru

**Михаил Вячеславович Хачумов**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, 152021? с. Вельково, Ярославская обл.; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва (ФИЦ ИУ РАН), 117313. г. Москва, Россия, пр. 60-летия Октября, д.9; доцент кафедры информационных технологий, ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов» Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. E-mail: khmike@inbox.ru

**Mikhail V. Khachumov**, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher, Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, 152021, Veskovo, Russian Federation,; Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Russian Federation (FRC CSC RAS), 117313. pr. 60-letiya Oktyabrya, 9; Docent of the Information Technologies Department, Peoples' Friendship University of Russia, 117198, Moscow Miklukho-Maklaya str. 6,. E-mail: khmike@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 16.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 18.07.2022.

Научная статья

УДК 656.61.052: 629.123: 004.021

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.025>

## Положения и методы разработки автоматического мониторинга безопасности судовождения

В.В. Астреин<sup>1</sup> [Astrein-vadim@rambler.ru](mailto:Astrein-vadim@rambler.ru) В.И. Филатов<sup>1</sup> [Filatov\\_viktor1994@mail.ru](mailto:Filatov_viktor1994@mail.ru)

<sup>1</sup>Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93

**Аннотация.** Первостепенная задача проектирования любых автономных систем безопасности судовождения — это разработка подсистемы автоматического мониторинга с последующим прогнозированием и принятием решений. В статье представлен ряд функциональных задач, которые необходимо решить для эффективной реализации системы общего мониторинга в виде программно-аппаратных комплексов, интегрируемых в процессы обеспечения безопасности судовождения. С ростом автоматизации внутренних технических систем судна, их функциональной и структурной сложности растет количество параметров, подлежащих оценке в системе мониторинга. Особенно это актуально при наличии внутренних или внешних угроз, приводящих систему в аварийное состояние. В настоящей работе на основе декомпозиции глобальной целевой задачи безопасности судовождения и анализа структуры автономного судна ставится задача разработки соответствующих положений и методов автоматического мониторинга, которые по некоторой совокупности датчиков в режиме реального времени позволяет прогнозировать состояние судна с необходимой достоверностью. В данной статье рассмотрены авторские методы разработки автоматического мониторинга для автономного судна. В статье поставлена и решена задача реконфигурации структуры системы автоматического мониторинга для решения функциональных задач при определении наличия опасности столкновения с другими судами (ОСС), являющаяся одной из важнейших задач в системе безопасности судовождения (СБС). В данной статье, также, приведены результаты исследований интеллектуального распознавания ОСС, основанного на использовании метода квантизации векторов обучения (LVQ).

**Ключевые слова:** автономное судовождение, система общего автоматического мониторинга, функциональные задачи СБС, структура системы автоматического мониторинга, реконфигурация структуры мониторинга, ИНС Кохонена

**Для цитирования:** Астреин В.В., Филатов В.И. Положения и методы разработки автоматического мониторинга безопасности судовождения. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 188—197.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.025>

## Provisions and methods for the development of automatic monitoring of navigation safety

Vadim V. Astrein<sup>1</sup> [Astrein-vadim@rambler.ru](mailto:Astrein-vadim@rambler.ru) Viktor I. Filatov<sup>1</sup> [Filatov\\_viktor1994@mail.ru](mailto:Filatov_viktor1994@mail.ru)

<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** The primary task of designing any autonomous navigation safety systems is the development of an automatic monitoring subsystem with subsequent forecasting and decision-making. The article presents a number of functional tasks that need to be solved for the effective implementation of the general monitoring system in the form of software and hardware complexes that are integrated into the processes of ensuring the safety of navigation. With the increase in the automation of the internal technical systems of the vessel, their functional and structural complexity, the number of parameters to be assessed in the monitoring system increases. This is especially true in the presence of internal or external threats that lead the system to an emergency state. In this work, based on the decomposition of the global target problem of navigation safety and analysis of the structure of an autonomous vessel, the task is to develop an appropriate method for automatic monitoring, which, using a certain set of sensors in real time, makes it possible to predict the state of the vessel with the required reliability. This article discusses the author's methods and provisions for the development of automatic monitoring for an autonomous vessel. The article posed and solved the problem of reconfiguring the structure of the automatic monitoring system to solve functional problems in determining the presence of a collision hazard with other ships, which is one of the most important tasks in the Navigation Safety System. This article also presents the results of research on intelligent recognition of collision, based on the use of the learning vector quantization (LVQ) methods.

**Key words:** autonomous navigation, general automatic monitoring system, the Navigation Safety System functional tasks, automatic monitoring system structure, monitoring structure reconfiguration, Self-organizing Kohonen maps.

**For citation:** Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov, Provisions and methods for the development of automatic monitoring of navigation safety, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 188—197.

### Введение

Комитет по безопасности на море (МСС) (100-я сессия, 3-7 декабря 2018 г.) [1] для целей

автономного судовождения определил четыре степени автономности судов. Первые три из них строятся по человеко-машинным технологиям с различной степенью и формой автоматизации внутренних и внешних процессов. Четвертая степень

автоматизации – полностью автономное судно: судовая операционная система способна принимать решения и определять действия самостоятельно обеспечивая безопасность судна. Неважно какая степень автоматизации автономного судна, важно то, что любая такая система, предназначена для целей обеспечения безопасности судна, в своей структуре должна иметь автоматическую *Систему мониторинга и контроля*, предназначенную для осуществления сбора данных, упорядочения, компьютерной обработки и анализа данных ситуации. Это означает, что мониторинг, выполняемый техническими средствами судна (ТСС) с постоянным наблюдением, оценкой и прогнозом его состояния должен отражать непрерывную последовательность опасных и безопасных состояний. Полученные данные становятся основой для выработки рациональных решений по переводу судна из опасного в безопасное состояние. Именно это и является настоящим результатом и конечной целью мониторинга и контроля СБС.

В последние десятилетия в области проектирования автоматического мониторинга динамических систем имеется довольно значительное количество российских исследований [2-9]. Однако применительно к судоводждению в области общего системного мониторинга остается широкое поле деятельности. Удалось частично автоматизировать мониторинг только систем судового главного двигателя. Все остальные задачи мониторинга и контроля как за внутренними, так и внешними параметрами судна и окружающей среды выполняются человеком вручную и носят проблемно-ориентированный характер. Поэтому исследования и разработки в области общего автоматического мониторинга в судоводждении являются в настоящее время крайне востребованными.

### 1. Задачи мониторинга и контроля

Исходя из постановки проблемы становится ясным, что общий мониторинг и контроль в автономном судоводждении должен производиться на единой платформе автоматическими системами, полностью исключая человека-оператора [10]. Отсюда ставится задача разработки соответствующих методов автоматического мониторинга и контроля состояния судна, которая по некоторой совокупности датчиков позволяет в дальнейшем прогнозировать состояние судна с необходимой достоверностью. В рассматриваемую *Систему автоматического мониторинга и контроля СБС (САМК СБС)* должны входить соответствующие математические методы и формы организации сбора, обработки и передачи информации, позволяющей определять и распознавать опасные и безопасные состояния системы.

#### 1.1. Мониторинг внутренней структуры СБС

Внутренняя структура судна представляет собой собранный и упорядоченный из подсистем набор сложных технических подсистем для того, чтобы, используя множество действий (событий), образующих функциональный класс, обеспечивать безопасность СБС в целом. Рассматривая задачи обеспечения безопасности внутренней структуры в рамках концепции целостности, можно говорить, что

речь идет о поддержании внутренних параметров судна, связанных с его структурными и функциональными характеристиками в допустимых пределах. Внутреннее описание процессов в форме уравнений состояний судна ближе к редуccionистскому подходу. В теории управления применяется ряд показателей, описывающих свойства внутренних подсистем. Признаками безопасности внутренних процессов являются параметры, величины которых лежат около их номинальных значений, зависящих от случайных обстоятельств. Процесс управления безопасной работой внутренних систем заключается в обнаружении неисправностей, вызванных случайными причинами. При определении приемлемого уровня неисправности любые отклонения от первоначального (построечного) состояния считают результатом действия особых причин, которые следует выявить, исключить или ослабить. Организация процесса судоводждения в настоящее время построена таким образом, что считается, что безопасность внутренних систем судна с механическим двигателем или обеспечена, или не обеспечена. В действительности технические подсистемы судна могут находиться во время эксплуатации в одном из трёх состояний: «исправно и работоспособно», «неисправно, но работоспособно» и «неисправно и неработоспособно». Фактическое существование состояния «неисправно, но работоспособно» приводит к необходимости детального изучения этой проблематики, так как введение этого состояния повлечет к изменению видения общей картины безопасности в СБС.

#### 1.2. Мониторинг внешней структуры СБС

Управление судном по взаимоотношению с «природой» и другими судами «группа судов» на практике, как уже оговаривалось выше, происходит без детального рассмотрения внутренней структуры и считается, что априори судно может противодействовать негативному влиянию природы и других судов и предпринимать действия для предупреждения аварийных происшествий или столкновений. Поэтому внешнее управление по типам «судно-природа» и «группа судов» в виде связи «вход-выход» ближе к *холистическому подходу*, так как оно не содержит информации о локальных внутренних процессах и связано только на отображении, связывающем входы с выходами системы.

#### 1.3. Проблема общего мониторинга СБС

С внедрением информационных технологий существенно изменился стиль и технологии управления судном, которые существенно повысили эффективность принимаемых решений. Сейчас судоводители и судомеханики имеют дело не только с показаниями приборов, а с данными информационных, информационно-измерительных и экспертных систем, анализируют сообщения о состоянии внутренней и внешней безопасности судна, синтезируют их и принимают решения по выбору управления судном. Такой подход к управлению судном повлек за собой создание Автоматизированных рабочих мест (АРМ) судоводителя и судомеханика. Сегодня организация

сбора информации на судах, ее обработка и хранение разобщена и структурирована по отдельным серверам: главного двигателя, навигационных систем и связи. Таким образом наряду с созданием АРМов и внедрением современных информационных технологий принципы организации мониторинга и контроля остались разобщенными. Разобщенность мониторинга и контроля по подсистемам не позволяет иметь целостное представление о состоянии судна, что понижает системность в целом.

С позиций системотехники разработка структуры САМК СБС должна сводиться к задаче проектирования системы централизованного сбора и обработки информации от датчиков своего судна, датчиков судов, распределенных в некотором географическом пространстве и берегового сегмента. САМК СБС должна объединять данные от различных измерительных устройств и предоставляет собой единую информационную платформу, состоящую из трех функциональных слоев:

1. Сбор данных в реальном времени с АРМов.

2. Обработка и анализ: хранение данных на сервере, применение встроенных инструментов расчета, поиск и систематизация данных.

3. Представление и визуализация информации как во внутренней, так и во внешней среде.

Центральный сервер судна — это ядро системы - единый источник информации. Центральный сервер получает данные и распределяет их в реальном времени с помощью компонентов системы и всей информационной инфраструктуры, позволяет отслеживать процессы в целом. В рассматриваемом контексте *ситуационный мониторинг* в автономном судовождении — это постоянное наблюдение за всеми процессами с целью установления их соотношения желаемому результату или первоначальному предположению. *Контроль* — это типичный пример действий, когда нужно выявить «опасность или опасности» по показаниям датчиков подсистем судна в соответствии с существующим порядком в режиме реального времени, т.е. в режиме обработки данных, при котором обеспечивается взаимодействие вычислительной системы с внешними по отношению к ней процессами в темпе, соизмеримым со скоростью протекания этих процессов.

## 2. Функциональные задачи СБС

Для безопасной работы СБС прежде всего возникает вопрос: какие параметры необходимо отслеживать и контролировать? В зависимости от цели управления, в судовождении выделяют следующие задачи: регулирования (стабилизации курса), ситуационного управления (плавание среди навигационных опасностей), планирования целесообразного поведения (предупреждения столкновений судов). Глобальная (общая) задача безопасности достигается решением задач во внутренней и внешней структуре судна:

$$ЗПР_{СБС} = (ЗПР_{ВБ}, ЗПР_{НБП}, ЗПР_{ПСС}) \quad (1)$$

где: ЗПР<sub>СБС</sub> — глобальная (общая) задача Системы безопасности судовождения, ЗПР<sub>ВБ</sub> — задача обеспечения безопасности подсистем внутренней структуры судна, ЗПР<sub>НБП</sub> — задача обеспечения

навигационной безопасности судна, ЗПР<sub>ПСС</sub> — задача предупреждения столкновений судов.

Безопасность в задачах судовождения достигается только циклическим решением совместных задач:

$$(ЗПР_{ВБ}, ЗПР_{НБП} \vee ЗПР_{ВБ}, ЗПР_{ПСС}) \quad (2)$$

По некоторым оценкам судоводители используют около 1000 параметров для решения задач судовождения (2) - перевода судна из опасного в безопасное состояние. Информация о состоянии судна может выступать в явном виде (точка на навигационной карте, угол перекадки руля и т.п.). Такие параметры не коррелируют с другими параметрами. В неявном виде: мощность двигателя и время кратчайшего сближения и т.п. В первом случае информация непосредственно позволяет дать оценку состояния судна, во втором случае для достоверной оценки состояния требуется производство измерений, расчетов, графических построений и пр., т.е. обработка информации. Учитывая такие особенности представления параметрической информации в рассматриваемой системе, первой задачей при построении САМК СБС является задача определения наиболее значимых параметров, которые необходимо контролировать при решении ЗПР<sub>СБС</sub>. Детализация наиболее значимых параметров в СБС приводится в [11]. Исходя из функциональных задач (2) покажем обобщенные параметры СБС следующим образом: каждый из внешних параметров подцелей и ограничений используемых в ЗПР<sub>НБП</sub> —  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , ЗПР<sub>ПСС</sub> —  $(b_1, b_2, \dots, b_k)$ , формирующих представление о состоянии судна зависит от внутренних параметров ЗПР<sub>ВБ</sub> и ограничений  $(c_1, c_2, \dots, c_p)$ , которые представляют собой подзадачи:

$$\begin{aligned} a_1 &= a_1(c_1, c_2, \dots, c_k); & b_1 &= b_1(c_1, c_2, \dots, c_k); \\ a_2 &= a_2(c_1, c_2, \dots, c_k); & b_2 &= b_2(c_1, c_2, \dots, c_k); \\ & & & \vdots \\ a_n &= a_n(c_1, c_2, \dots, c_k); & b_n &= b_n(c_1, c_2, \dots, c_k). \end{aligned} \quad (3)$$

или в векторном виде:

$$\begin{aligned} \bar{a}(c) &= [a_1(\bar{c}), a_2(\bar{c}), \dots, a_n(\bar{c})] \\ \bar{b}(c) &= [b_1(\bar{c}), b_2(\bar{c}), \dots, b_n(\bar{c})] \end{aligned} \quad (4)$$

Мониторинг параметров (4) описывает функциональную связь между показателями работоспособности Систем управления курсом и скоростью (ВБ), показателями управления судна по маршруту (НБП) и предупреждения столкновения судов (СПСС).

По мониторингу  $\bar{a}(c) = [a_1(\bar{c}), a_2(\bar{c}), \dots, a_n(\bar{c})]$  описывается состояние судна для решения ЗПР<sub>НБП</sub>. А по мониторингу  $\bar{b}(c) = [b_1(\bar{c}), b_2(\bar{c}), \dots, b_n(\bar{c})]$  описывается состояние судна для решения ЗПР<sub>ПСС</sub>. В действительности в некотором географическом районе плавания одновременно могут находиться М судов. Тогда для решения ЗПР<sub>ПСС</sub> необходимо проведение мониторинга ни за одним, а за множеством судов в этом районе плавания  $\{\bar{B}_m(c); \text{ где } m \in M = \{1, \dots, M\}\}$  — множество взаимодействующих судов, с которыми наше судно осуществляет взаимодействие (информационное, энергетическое). Тогда общую параметрическую структуру мониторинга (4), включающего М судов, можно представить в следующем виде:

$$\bar{a}(c) = [a_1(\bar{c}), a_2(\bar{c}), \dots, a_n(\bar{c})];$$

$$\bar{B}_m(c) = \{[b_{11}(\bar{c}_{11}), b_{21}(\bar{c}_{21}), \dots, b_{n1}(\bar{c}_{n1})], \dots, (5)$$

$$[b_{12}(\bar{c}_{12}), b_{22}(\bar{c}_{22}), \dots, b_{n2}(\bar{c}_{n2})], \dots,$$

$$[b_{1m}(\bar{c}_{1m}), b_{2m}(\bar{c}_{2m}), \dots, b_{nm}(\bar{c}_{nm})]\}$$

где индекс  $n$  - означает номер параметра судна, а индекс  $m$  - означает номер судна.

### 3. Реконфигурирование структуры САМК СБС

Общий мониторинг САМК СБС осуществляется постоянно. Однако обеспечение безопасности судоходства достигается двумя непересекающимися подпроцессами (2), с циклическим переходом от одного подпроцесса к другому. Этот переход осуществляется тогда, когда среди  $\bar{B}_m(c)$  в некоторый момент времени наблюдения за параметрами судов, распределенных в некотором районе плавания обнаруживается вектор «опасности столкновения судов» (ОСС), задаваемый соответствующим набором факторов или несколькими подобными наборами факторов, полученных в следствие мониторинга  $M$  судов. При обнаружении факторов существования опасности столкновения САМК СБС реконфигурируется на решение задачи расхождения с одним судном или с группой судов. В этом случае структурную динамику перехода можно описать  $j$ -ым вектором «опасности столкновения» для  $i$ -го судна:  $[b_{ji}(\bar{c}_{ji})]$  для которого определены пороговые значения  $[\tilde{b}_{ji}(\bar{c}_{ji})]$  такие, что:

$$\begin{aligned} \text{Если } [b_{ji}(\bar{c}_{ji})] > [\tilde{b}_{ji}(\bar{c}_{ji})], \text{ то } [b_{ji}(\bar{c}_{ji})] &= 1 \\ \text{Если } [b_{ji}(\bar{c}_{ji})] < [\tilde{b}_{ji}(\bar{c}_{ji})], \text{ то } [b_{ji}(\bar{c}_{ji})] &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

«Опасность столкновения» существует, когда пороговое значение определяется как 1, и если 0, то «опасности столкновения нет». Следовательно САМК СБС должна обладать свойством реконфигурировать структуру на выполнение функциональных задач таким образом, чтобы подсистемы (5) могли на различных интервалах времени находиться в пассивном или активном режиме, т.е. должна происходить динамическая декомпозиция САМК СБС. Полученные в результате структуры (ЗПР<sub>ВВ</sub>, ЗПР<sub>НВП</sub> и ЗПР<sub>ВВ</sub>, ЗПР<sub>ПСС</sub>) рассматриваются как ситуационные мониторинговые модели, отражающие состояние судна при плавании среди навигационных опасностей или предупреждения столкновения судов.

Для описания подобных систем могут быть использованы разные модели [19,20,21]. В нашем случае структурно-функциональную реконфигурацию САМК СБС предлагается описывать, активируя или деактивируя подсистемы для решения задач (2) при существовании угрозы столкновения судов. Тогда общую структуру динамической реконфигурируемой системы мониторинга САМК СБС можно представить в следующем виде:

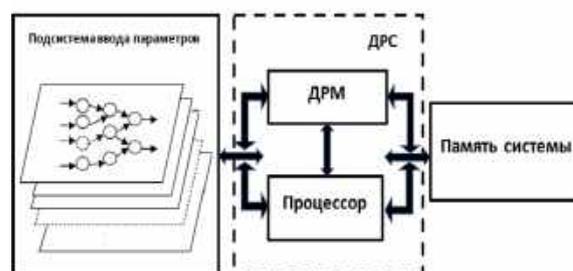


Рис. 1 Обобщенная структурная схема динамической реконфигурируемой САМК СБС

Динамически реконфигурируемая система (ДРС) мониторинга САМК СБС — это класс вычислителей, способных менять свою внутреннюю логическую структуру непосредственно в процессе функционирования [19].

В структуре САМК СБС предусмотрен динамически реконфигурируемый модуль (ДРМ) (вычислитель), который предназначен для реализации вычислительных операций и основной элементной базой которого на сегодняшний день являются программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), а также управляющего модуля, который фактически представляет собой Процессор. Задача процессора уметь решать задачи распознавания, контроля и обнаружения опасности и неисправностей как во внутренней структуре судна, так и в окружающей среде: опасность сближающихся судов, стационарных и динамических объектов, с тем чтобы в некоторый момент времени подсистемы могли отключаться или наоборот подключаться в зависимости от опасности, определяемой в системе мониторинга для решения функциональных задач. Именно наличие в составе ДРС динамически реконфигурируемого модуля ДРМ и Процессора позволяют реализовывать динамическую реконфигурацию САМК СБС под воздействием тех или иных причин, сохраняя топологию подсистем без изменения.

### 4. Задача изменения внутренней логической структуры по обнаружению опасности столкновения судов

В основе ДРС лежит принцип реконфигурации модели по обнаружении признаков ОСС, являющийся ключевой задачей мониторинга. Наличие ОСС является основанием для реконфигурации ЗПР<sub>СБС</sub>. Анализ методов определения наличия ОСС [13] показывает, что наиболее часто используемым методом для решения ЗПР<sub>ПСС</sub> рассматривается судовой домен безопасности или приводится исследование каких-либо параметров, которые, в зависимости от ситуации, могут наиболее репрезентативно показать наличие опасности столкновения:  $v_{SOG}$  — действительная скорость судна,  $D_i$  — текущая дистанция между судами,  $L$  — длина судна,  $t_{кр}$ ,  $D_{кр}$  — время и дистанция кратчайшего сближения между судами,  $KУ$  — курсовой угол цели. Краткий обзор методов решения таких задач представлен в таблице 1.

Таблица 1  
Некоторые методы решения ЗПР<sub>псс</sub>. [13]

№	Авторы исследования	Метод	Входные параметры
1.	Fujii and Tanaka (1971)	Судовой домен безопасности	$v_{SOG}$
2.	Wan g (2010)	Параметрическа я	$L, v_{SOG}$
3.	Wang and Chin (2016)	Мониторинг относительных параметров сближения	$L, v_{SOG}$
4	Mou et al (2010)	Параметрическа я	$t_{кр}, D_{кр}, KУ$
5	Kearon (1977)	Параметрическа я	$t_{кр}, D_{кр}$
6	Kijima and Furukawa (2001)	Параметрическа я	$t_{кр}, D_{кр}$
7	Zhao et al (2016)	Параметрическа я	$t_{кр}, D_{кр}, v$
8	Szlapczynski and Szlapczynska (2016)	Судовой домен безопасности совместно с параметром $D_{кр}$	$t_{кр}, L$

В отличие от методов таблицы 1 в настоящем исследовании применяется авторский метод обнаружения ОСС в соответствии с МППСС-72. Согласно Правилу 7 *Опасность столкновения* всё множество судов может быть представлено в виде функции от двух переменных: П – пеленг с судна наблюдателя на судно-цель и Д – дистанция между судном наблюдателя и судном целью:

$$ЗПР_{псс} = \{(\Pi_t^i, D_t^i) \mid t \in T, i = \overline{1, M}\} \quad (7)$$

где:  $i$  – индекс судна цели,  $t$  – момент времени наблюдения.

В качестве источников мониторинга за этими параметрами могут применяться: Автоматическая идентификационная система (АИС) и Радиолокационная станция (РЛС). Использование АИС и РЛС в САМК СБС прежде всего предназначено для повышения надежности мониторинга методами функционального резервирования, т.е. не аналогичными по своей структуре и основанными на совершенно иных принципах, осуществляемых техническими средствами судовождения для наблюдения за параметрами судов. Использование РЛС, кроме обнаружения судов, позволяет вести мониторинг плавающих динамических объектов (сорванные со штатного места буи, брошенные яхты и т.д.). Результаты избыточных наблюдений с помощью АИС и РЛС образуют полную выборку ситуационной модели предупреждения столкновений судов в соответствии с требованиями Правил 5 *Наблюдение*: «вести постоянное наблюдение ... с помощью всех имеющихся средств».

В соответствии с этими условиями на начальном этапе предлагается произвести линеаризацию табличной функции (7) с помощью оценочной регрессионной модели, в основе которой лежит

метод наименьших квадратов. Такой метод позволяет уйти от дискретного временного ряда к непрерывной временной функции и выполнить её анализ.

### 5. Анализ и представление непрерывной временной функции с помощью парной линейной регрессии

Пусть  $\Pi, D = Y, t = X$ . Тогда можно составить уравнение связи двух переменных  $Y, X$ . Такое уравнение является уравнением парной регрессии вида:

$$Y=f(X) \quad (8)$$

где  $Y$  – результат наблюдений (зависимая переменная),  $X$  – независимая переменная (лаг наблюдения). Тогда уравнение линейной регрессии можно записать в виде:

$$Y_i = a_0 + a_1 X_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

где:  $a_0, a_1$  – коэффициенты регрессии,  $n$  – общее количество наблюдений,  $\varepsilon_i$  – ошибка измерения.

Чтобы вычислить  $a_0, a_1$ , необходимо к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) применить метод наименьших квадратов (МНК). Найдём средние значения по каждой переменной:  $\bar{X} = \sum X_i/n, \bar{Y} = \sum Y_i/n$ , тогда:

$$S_{XY} = \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = \sum X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y} \quad (10)$$

$$S_{XX} = \sum (X_i - \bar{X})^2 = \sum X_i^2 - n \bar{X}^2$$

Теперь, пользуясь этими параметрами, можно вычислить коэффициент  $a_0, a_1$ :

$$a_1 = S_{XY}/S_{XX} \quad (11)$$

$$a_0 = \bar{Y} - a_1 \bar{X}$$

Подставив эти коэффициенты в исходное уравнение, можно получить оценку уравнения регрессии:

$$\tilde{Y}_i = \bar{Y} + a_1 (X_i - \bar{X}) \quad (12)$$

Теперь необходимо оценить степень близости  $\tilde{Y}_i$  к  $Y_i$ . Это можно сделать путём вычисления квадрата множественного коэффициента корреляции – коэффициента детерминации:

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum (Y_i - \tilde{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \right) \quad (13)$$

При  $R^2 \approx 1$  можно сказать, что оценочная линейная регрессия построена достаточно близко к исходной табличной функции и следовательно гипотеза о линейном характере изменения функции может быть принята. На основании построения оценочных линейных регрессий по табличным функциям получено множество регрессий некоррелированных между собой функций всех судов в некотором районе плавания:  $\tilde{\Pi}(t), \tilde{D}(t)$ . Таким образом выполнен переход от временного ряда к временной функции, что позволит выполнять дифференцирование в любой момент времени.

Задача ЗПР<sub>псс</sub> – рассматривается как случайная вектор-функция. Соответственно, семейство, всех траекторий  $\tilde{ЗПР}_{псс}(t)$  с соответствующей вероятностной структурой называется случайным процессом, а отдельная реализация  $\tilde{\Pi}(t), \tilde{D}(t)$  являются временной функцией.

Продифференцируем обе функции:

$$\begin{cases} \Delta \tilde{\Pi}(t) = f(t + \Delta t) - f(t) = (1 - L)\tilde{\Pi}(t) \\ \Delta \tilde{D}(t) = f(t + \Delta t) - f(t) = (1 - L)\tilde{D}(t) \end{cases} \quad (14)$$

где  $L$  – лаговый оператор.

Теперь можно вычислить производные первого порядка этих функций в момент времени через предел:

$$\begin{cases} \tilde{\Pi}'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t) - f(t_0)}{t - t_0} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \tilde{\Pi}}{\Delta t} \approx \frac{\partial \tilde{\Pi}}{\partial t} \\ \tilde{D}'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t) - f(t_0)}{t - t_0} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \tilde{D}}{\Delta t} \approx \frac{\partial \tilde{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (15)$$

$\tilde{D}'(t)$  в данном случае – скорость относительного сближения судна наблюдателя (СН) и судном цели (СЦ). Далее метрика производных приведена к традиционному для судовождения виду, где шкалирование абсциссы ряда определено минутным лагом.

Формальное выражение «приближающееся судно» соответствует утверждению «дистанция судном наблюдателя (СН) и (СЦ) уменьшается». Можно формализовать этот признак наличия опасности столкновения с помощью производной, воспользовавшись её свойствами. Для того, чтоб  $\tilde{D}'(t)$  считалась убывающей на интервале  $[t, t_k]$  необходимо и достаточно, чтобы первая производная функции была отрицательной на всём временном интервале. Тогда можно формализовать опасность столкновения в виде факторного пространства:

$$\begin{cases} \tilde{D}'(t) < 0 \forall t \in (t_0, t_k) \wedge R_{\tilde{D}}^2(t) \rightarrow 1 \forall t \in [t_0, t_k] \\ \tilde{\Pi}'(t) \rightarrow 0 \forall t \in (t_0, t_k) \wedge R_{\tilde{\Pi}}^2(t) \rightarrow 1 \forall t \in [t_0, t_k] \end{cases} \quad (16)$$

где:  $t_0$  – момент первого обнаружения СЦ,  $t_k$  – момент реального времени.

На рисунке 2 представлен фазовый портрет поведения СЦ, с которым существует опасность столкновения. Он состоит из табличной функции – временного ряда, а также её аппроксимированной функции оценочной линейной регрессии. Приведённые траектории в пространстве состояний отчётливо отражают ситуацию, сформулированную в Правиле 7 Опасность столкновения:

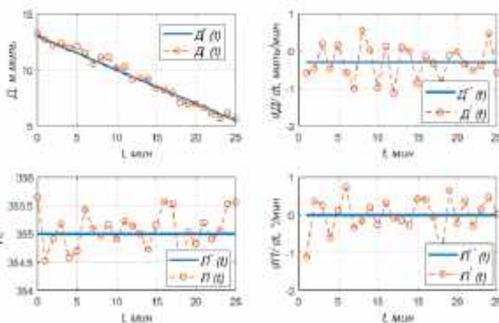


Рис. 2. Фазовый портрет при ОСС. Поведение функций  $\Pi$ ,  $D$  и функций их первых частных производных от времени наблюдения за СЦ. Такая ситуация может рассматриваться, как ситуация, в которой риск столкновения с СЦ существует.

## 6. Задача классификации, нелинейное разделение множества судов на опасные и безопасные.

### 6.1. Формализация и постановки задачи классификации в задачах ЗПР<sub>ПСС</sub>

В данной работе предлагается метод решения задачи классификации – нелинейного разделения

множества судов на опасные и безопасные с помощью интеллектуальной самоорганизующейся системы, способной классифицировать СЦ на опасные суда – ОС, и неопасные – НС.

В данном случае под классификацией, в машинном обучении, понимается задача понижения размерности входного вектора из  $n$  объектов до  $m$  классов. Применительно к ЗПР<sub>ПСС</sub> математически задача поставлена, как разделение  $X_{СЦ} = \{x_i | x_i = \langle \tilde{\Pi}'_i, \tilde{D}'_i, R_i^2 \rangle, R_i^2 \approx 1, i = \overline{1, n}\}$  – множества СЦ на два класса:  $Y_{ПСС} = \{y_i | y_i = \langle Y_{iОС}, Y_{iНС} \rangle, i = \overline{1, n}\}$ , где циклическая группа определяется последовательностью моментов наблюдений. В качестве алгоритма классификации в данной работе предлагается использовать метод квантизации векторов обучения – LVQ, искусственные нейронной сети (ИНС), в основе которой лежит алгоритм самоорганизующихся карт Кохонена (SOM) [4]. Тогда задача определения ОСС является отображением LVQ:  $X_{СЦ} \rightarrow Y_{ПСС}$ . На рисунке 3 представлена структурная схема архитектуры ИНС LVQ, применительно к ЗПР<sub>ПСС</sub>.

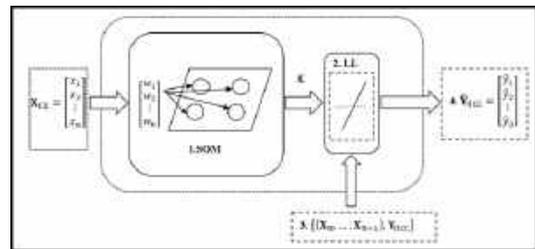


Рис. 3. Структурная схема архитектуры ИНС LVQ, применительно к ЗПР<sub>ПСС</sub>. Под цифрой 1. Слой, состоящий из самоорганизующейся карты извлечения признаков SOM; 2 – Линейный слой квантизации вектора обучения; 3 – Обучающая выборка для задачи обучения с учителем, 4 – оценка принадлежности к целевым классам.

### 6.2. Подзадача кластеризации с помощью алгоритма SOM.

Самоорганизующиеся карты Кохонена – это ИНС, предназначенная для нелинейной кластеризации данных входного вектора обучения, а именно для извлечения из него «скрытых» признаков. Кластеризация относится к методам обучения без учителя. В работах (Хайкина, Кохонена) [4, 14] подробно рассмотрен алгоритм SOM. В данной статье подробное описание этого алгоритма опускается, ввиду громоздких математических выкладок, и ограничено лишь основными этапами.

На начальном этапе выполняется инициализация начальных весов:

$$w_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jm}]^T \quad j = \overline{1, l} \quad (17)$$

$l$  – общее количество нейронов,  $m$  – размерность входного пространства.

Следующим этапом алгоритма является процесс конкуренции. На этом этапе происходит поиск наиболее подходящего нейрона  $i(x)$  на шаге  $n$ , минимизируя критерий Евклидовой нормы:

$$i(x) = \arg \min_j \|x - w_j\| \quad (18)$$

На третьем этапе вычисляется топологическая окрестность победившего нейрона. Этот параметр определяет расстояние, до которого нейроны, из окрестности  $i(x)$  участвуют в процессе обучения. Унимодальная функция топологической окрестности с экстремумом в победившем нейроне  $i(x)$ , выражена Гауссойдой:

$$h_{j,i(x)} = e^{-\left(a_{i,j}^2/2\sigma^2\right)} \quad (19)$$

где:  $\sigma$  – дисперсия, являющаяся эффективной  $h_{j,i(x)}$ ,  $a_{i,j}^2 = \|r_j - r_i\|^2$ ,  $r_j$  – положение возбуждаемого нейрона,  $r_i$  – позиция победившего нейрона. В данном координаты нейрона определены, как  $r = (P', D')$ . В свою коррекция  $\sigma$  может быть рассчитана в зависимости от временной константы  $\tau_1$  по формуле:

$$\sigma(n) = \sigma_0 e^{-\left(n/\tau_1\right)}. \quad (20)$$

На следующем этапе выполняется коррекция вектора синаптических весов всех нейронов по следующему алгоритму:

$$\mathbf{w}_j(n+1) = \mathbf{w}_j(n) + \eta(n)h_{j,i(x)}(n)(\mathbf{x} - \mathbf{w}_j)(n) \quad (21)$$

где:  $\eta$  – параметр скорости обучения,  $n$  – шаг обучения.

Таким образом эти этапы повторяются до тех пор, пока в карте признаков не перестанут происходить заметные изменения [14]. На выходе этого слоя получен вектор Вороного  $\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_l]$ , с номером кластера, которому принадлежит входной вектор. В данной концепции  $\mathbf{K}$  рассматривается, как вектор Вороного (численное значение  $k_1, k_2, \dots, k_l$  соответствует своей ячейке на диаграмме Вороного - рис. 4). Алгоритм SOM является приближённым методом построения диаграммы Вороного. Пример построения такой диаграммы представлен на рис. 4 для множества нормированной обучающей выборки  $X_{\text{СЦ}}$ , при  $n = 2000$  в момент времени до начала кластеризации.

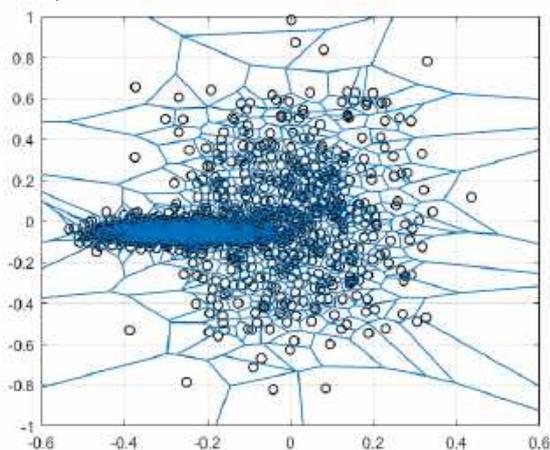


Рис. 4. Диаграмма Вороного для обучающего множества  $X_{\text{СЦ}}$  при нормировании до начала обучения ИНС Кохонена.

На рисунке 5 представлена кластеризация  $X_{\text{СЦ}}$  для понижения размерности и извлечения признаков при обучении без учителя. В данной статье для формирования топологического пространства определена ИНС Кохонена с гексагональной сеткой, размерностью  $l = [6^2]$ . Это означает, что, в

результате обучения ИНС без учителя, на выходе получено 36 кластеров.

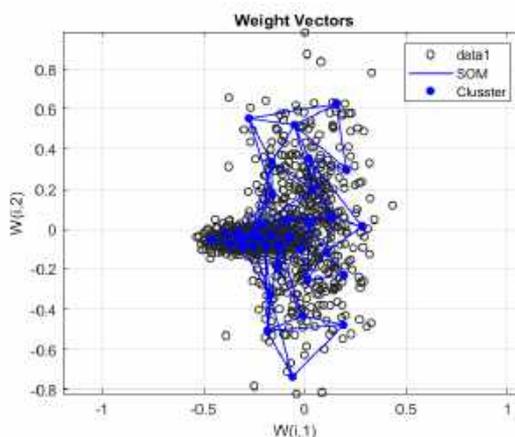


Рис. 5 Самоорганизующаяся карта после определения центров всех кластеров. Укладка сетки графа на центры  $i(x)$ . Кластеризация обучающей выборки  $X_{\text{СЦ}}$  в слое SOM. Этап обучения без учителя.

Недостатком Алгоритм LVQ является, отсутствие возможности корректировки принадлежности элемента входного вектора к кластеру. Чтобы устранить этот недостаток, на выходе из SOM, добавлен линейный слой (рис. 3), который выполняет функцию обучения с учителем

Таким образом новая обучающая выборка имеет прецедентную структуру –  $\{K, Y_{\text{ПСС}}\}$ . В данном блоке обучения выполнена и коррекция весов по следующему правилу:

$$\mathbf{w}_c(n+1) = (1 - s_n \alpha_n) \mathbf{w}_c(n) + s_n \alpha_n (\mathbf{x}(n)) \quad (22)$$

где:  $\alpha_n = (1 - s_n \alpha_n) \alpha_{n-1}$  – критерий оптимизации [14].

### 6.3. Численное моделирование эксперимента по обнаружению опасных судов

В таблице 2 приведены численные результаты серии экспериментов по классификации СЦ на ОС и ИС. В качестве классификатора использована ИНС, обученная по алгоритму LVQ.  $N$  – порядковый номер эксперимента в серии,  $M$  – общее количество судов в районе плавания,  $M^*$  – количество корректно классифицированных судов,  $M^*, \%$  – процент корректной классификации,  $\epsilon, \%$  – процент ошибки классификации в эксперименте.

Таблица 2

#### Результаты численного моделирования классификации судов в рамках концепции реконфигурируемых систем мониторинга

N/N	M	M*	M*, %	ε, %
1	25	23	92,0	8,0
2.	30	27	90,0	10,0
3.	45	41	91,11	8,89
4.	45	43	95,5	4,5
5.	26	26	100	0

Средняя оценка ошибки классификации в данной серии составляет  $\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^N \epsilon}{N} = 6.278 \%$ . На рис. 6

приведены результаты одного из экспериментов по классификации при решении задачи ЗПР<sub>ПСС</sub>.

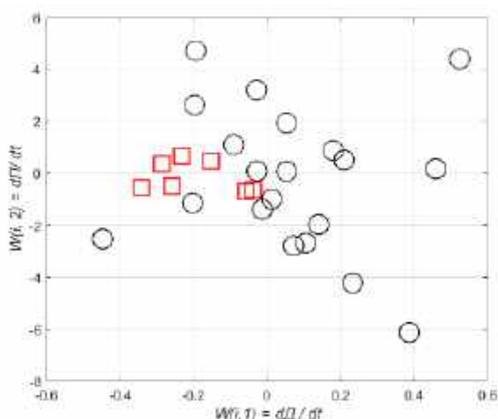


Рис. 6 Численный эксперимент классификации ОСС. Приближённое решение задачи ЗПР<sub>ПСС</sub>, классификация  $X_{СЦ}$ . С помощью квадратных меток определено множество опасных судов -  $Y_{ОС}$ .

### Заключение

В данной статье рассмотрены некоторые положения для разработки СППР БС. Детально описан блок мониторинга, сформулированы

основные правила построения систем мониторинга БС. Предложен метод, основанный на реконфигурируемых системах в качестве математического аппарата для построения САМК СБС. Также рассмотрены некоторые элементы систем интеллектуального мониторинга, а именно подзадача определения наличия ОСС, являющаяся важнейшей, для ОБС. В статье приведено оригинальное решение данной подзадачи с комплексным анализом навигационной информации, поступающей от разных ТСС. В математический комплекс входят:

- анализ временного ряда и построение оценочной линейной регрессии;
- расчёт коэффициента детерминации, для принятия гипотезы о равномерном прямолинейном сближении;
- использование ИНС для задачи классификации опасных целей с возможностью корректирования параметров ИНС для улучшения обобщающей способности и выделения более полного количества признаков в факторном пространстве.

Жизнеспособность приведённой модели подкреплена результатами численного моделирования. Приведённый метод решения задач этого класса является научной новизной и может быть использована для построения САМК СБС при создании СППР БС.

### Литература

1. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
2. Кириллов, А.Н. Динамические системы с переменной структурой и размерностью Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 3. С. 23–28.
3. Кириллов, А.Н. Метод динамической декомпозиции в моделировании систем управления со структурными изменениями Информационно-управляющие системы. 2009. № 1 (38). С. 20–24.
4. Кохонен, Т. Самоорганизующиеся карты. м.: Бином. лаборатория знаний, 2008. 655 с.
5. Луферов, В. С. Интеллектуальная система нейро-нечеткого анализа и многомерного прогнозирования сложных процессов Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. -2021. -№07. -С. 96-102 DOI 10.37882/2223-2966.2021.07.22
6. Охтилев, П.А., Бахмут А.Д., Крылов А.В. Обзор и применение моделей представления знаний в интеллектуальной системе мониторинга структурных состояний сложных организационно-технических объектов Сб. докл. научной сессии ГУАП: в 3 ч. – СПб.: ГУАП, 2017 – Ч. 2: Технические науки. – С. 266–277.
7. Охтилев, М. Ю., Б. В. Соколов. Новые информационные технологии мониторинга и управления состояниями сложных технических объектов в реальном масштабе времени Труды СПИИРАН. Вып. 2, т. 2. — СПб.: Наука, 2005
8. Охтилев, М. Ю., Соколов Б. В. Теоретические и прикладные проблемы разработки и применения автоматизированных систем мониторинга состояния сложных технических объектов Труды СПИИРАН / Под редакцией доктора технических наук, профессора Юсупова Р.М. Выпуск 1. Том 1. СПб.: СПИИРАН, 2002. — С. 167–180
9. Охтилев, М.Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа / М.Ю. Охтилев. СПб: ВИКУ им. Можайского, 1999. 161 с. 3. Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов/М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. М.: Наука, 2006. 410 с.
10. Филиппов, А. К. Теоретические основы проектирования динамически реконфигурируемых систем обработки информации: учеб. пособие / А. К. Филиппов; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 119 с.
11. Симанков, В.С. Основные методологические аспекты организации и функционирования систем поддержки принятия решений безопасности судовождения / В.С. Симанков, В. В. Астреин Эксплуатация морского транспорта. - 2016.- № 2(79) – С. 56-64.
12. Астреин, В.В. Основы интеллектуальных систем предупреждения столкновений судов (монография) / В. В. Астреин Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2014. 400 с.
13. Ha, Jisang & Roh, Myung-Il & Lee, Hyewon. (2021). Quantitative calculation method of the collision risk for collision avoidance in ship navigation using the CPA and ship domain. Journal of Computational Design and Engineering. 8. 894-909. 10.1093/jcde/qwab021.
14. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. Пер. с англ. м.: ИД «Вильямс», 2008. 1104 с.

15. Lakhdhar, W., Mzid, R., Khalgui, M., Li, Z., Frey, G., Al-Ahmari, A.: Multiobjective optimization approach for a portable development of reconfigurable real-time systems: from specification to implementation. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.* 49, 623–637 (2018)
16. Lyke, J.C., Christodoulou, C.G., Vera, G.A., Edwards, A.H.: An introduction to reconfigurable systems. *Proc. IEEE* 103(3), 291–317 (2015)
17. Yanase, R., Sakai, T., Sakai, M., Yamane, S.: Formal verification of dynamically reconfigurable systems. In: *Proceedings IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 71–75, October 2015
18. Zhang, J., et al.: Modeling and verification of reconfigurable and energy-efficient manufacturing systems. *Discret. Dyn. Nat. Soc.* 2015, 14 (2015)
19. Zhang, J., Khalgui, M., Li, Z., Frey, G., Mosbahi, O., Salah, H.B.: Reconfigurable coordination of distributed discrete event control systems. *IEEE Trans. Control Sys. Techn.* 23(1), 323–330 (2015)
20. Wang, C., Pastore, F., Briand, L.: System testing of timing requirements based on use cases and timed automata. In: *Proceedings IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation ICST. IEEE* (2017)
21. Wang, X., Li, Z., Wonham, W.M.: Dynamic multiple-period reconfiguration of real-time scheduling based on timed DES supervisory control. *IEEE Trans. Ind. Inf.* 12(1), 101–111 (2016). <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2500161>
22. Павлов А.Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов Труды СПИИРАН. 2013. № 5 (28). С. 143–168.
23. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с.
24. Козов, А.В. Модели и методы проектирования динамически реконфигурируемой системы группового управления мобильными роботами Автоматизация процессов управления № 1 (63) 2021. С. 130-139. doi: 10.35752/1991-2927-2021-1-63-130-139

#### References

1. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3-7 December 2018 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx>
2. Kirillov A.N. Dinamicheskie sistemy s peremennoy strukturoy i razmernost'yu *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie.* 2009. T. 52, № 3. S. 23–28.
3. Kirillov A.N. Metod dinamicheskoy dekompozitsii v modelirovaniy sistem upravleniya so strukturnymi izmeneniyami *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy.* 2009. № 1 (38). S. 20–24.
4. Kokhonen T. *Samoorganizuyushchiesya karty.* m.: Binom. laboratoriya znaniy, 2008. 655 s.
5. Luferov V. S. *Intellectual'naya sistema neyro-nechetkogo analiza i mnogomernogo prognozirovaniya slozhnykh protsessov* *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki.* Seriya: Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki. -2021. -№07. -S. 96-102 DOI 10.37882/2223-2966.2021.07.22
6. Okhtilev P.A., Bakhmut A.D, Krylov A.V. Obzor i primeneniye modeley predstavleniya znaniy v intellektual'noy sisteme monitoringa strukturnykh sostoyaniy slozhnykh organizatsionno-tekhnicheskikh ob"ektov *Sb. dokl. nauchnoy sessii GUAP: v 3 ch. – SPb.: GUAP, 2017 – Ch. 2: Tekhnicheskie nauki. – S. 266–277.*
7. Okhtilev M. Yu., B. V. Sokolov. *Novye informatsionnye tekhnologii monitoringa i upravleniya sostoyaniyami slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov v real'nom masshtabe vremeni* *Trudy SPIIRAN. Vyp. 2, t. 2. — SPb.: Nauka, 2005*
8. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V. *Teoreticheskie i prikladnye problemy razrabotki i primeneniya avtomatizirovannykh sistem monitoringa sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov* *Trudy SPIIRAN / Pod redaktsiey doktora tekhnicheskikh nauk, professora Yusupova R.M. Vypusk 1. Tom 1. SPb.: SPIIRAN, 2002. — S. 167–180*
9. Okhtilev, M.Yu. *Osnovy teorii avtomatizirovannogo analiza izmeritel'noy informatsii v real'nom vremeni. Sintez sistemy analiza / M.Yu. Okhtilev. SPb: VIKU im. Mozhayskogo, 1999. 161 s. 3. Okhtilev M.Yu. Intellectul'nye tekhnologii monitoringa sostoyaniya i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov/M.Yu. Okhtilev, B.V. Sokolov, R.M. Yusupov. M.: Nauka, 2006. 410 s.*
10. Filippov, A. K. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya dinamicheski rekonfiguriruemyykh sistem obrabotki informatsii: ucheb. posobie / A. K. Filippov; Vladimir. gos. un-t. – Vladimir: Izd-vo Vladimir. gos. un-ta, 2009. – 119 s.*
11. Simankov, V.S. *Osnovnye metodologicheskie aspekty organizatsii i funktsionirovaniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy bezopasnosti sudovozhdeniya / V.S. Simankov, V. V. Astrein* *Ekspluatatsiya morskogo transporta. - 2016.- № 2(79) – S. 56-64.*
12. Astrein, V.V. *Osnovy intellektual'nykh sistem preduprezhdeniya stolknoveniy sudov (monografiya) / V. V. Astrein* *Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2014. 400 s.*
13. Ha, Jisang & Roh, Myung-Il & Lee, Hyewon. (2021). Quantitative calculation method of the collision risk for collision avoidance in ship navigation using the CPA and ship domain. *Journal of Computational Design and Engineering.* 8. 894-909. [10.1093/jcde/qwab021](https://doi.org/10.1093/jcde/qwab021).
14. Khaykin S. *neyronnye seti: polnyy kurs. 2-e izd. Per. s angl. m.: ID «Vil'yams», 2008. 1104 s.*
15. Lakhdhar, W., Mzid, R., Khalgui, M., Li, Z., Frey, G., Al-Ahmari, A.: Multiobjective optimization approach for a portable development of reconfigurable real-time systems: from specification to implementation. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.* 49, 623–637 (2018)
16. Lyke, J.C., Christodoulou, C.G., Vera, G.A., Edwards, A.H.: An introduction to reconfigurable systems. *Proc. IEEE* 103(3), 291–317 (2015)
17. Yanase, R., Sakai, T., Sakai, M., Yamane, S.: Formal verification of dynamically reconfigurable systems. In: *Proceedings IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 71–75, October 2015
18. Zhang, J., et al.: Modeling and verification of reconfigurable and energy-efficient manufacturing systems. *Discret. Dyn. Nat. Soc.* 2015, 14 (2015)

19. Zhang, J., Khalgui, M., Li, Z., Frey, G., Mosbahi, O., Salah, H.B.: Reconfigurable coordination of distributed discrete event control systems. *IEEE Trans. Control Sys. Techn.* 23(1), 323–330 (2015)
20. Wang, C., Pastore, F., Briand, L.: System testing of timing requirements based on use cases and timed automata. In: *Proceedings IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation ICST*. IEEE (2017)
21. Wang, X., Li, Z., Wonham, W.M.: Dynamic multiple-period reconfiguration of real-time scheduling based on timed DES supervisory control. *IEEE Trans. Ind. Inf.* 12(1), 101–111 (2016). <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2500161>
22. Pavlov A.N. Kompleksnoe modelirovanie strukturno-funktsional'noy rekonfiguratsii slozhnykh ob"ektov Trudy SPIIRAN. 2013. № 5 (28). S. 143–168.
23. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov. M. : FIZMATLIT, 2009. 280 s.
24. Kozov, A.V. Modeli i metody proektirovaniya dinamicheski rekonfiguriruemoy sistemy gruppovogo upravleniya mobil'nymi robotami Avtomatizatsiya protsessov upravleniya № 1 (63) 2021. S. 130-139. doi: 10.35752/1991-2927-2021-1-63-130-139

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

**Вадим Викторович Астреин**, доктор технических наук, капитан дальнего плавания, профессор кафедры «Судовождение», Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: [Astrein-vadim@rambler.ru](mailto:Astrein-vadim@rambler.ru).

**Vadim V. Astrein**, Dr. Sci. (Eng), Master Marine, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: [Astrein-vadim@rambler.ru](mailto:Astrein-vadim@rambler.ru).

**Виктор Иванович Филатов**, аспирант кафедры «судовождение», Старший помощник капитана. Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: [Filatov\\_viktor1994@mail.ru](mailto:Filatov_viktor1994@mail.ru).

**Viktor I. Filatov**, graduate student of the Department of Navigation, Chief Officer, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: [Filatov\\_viktor1994@mail.ru](mailto:Filatov_viktor1994@mail.ru).

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.07.2022.

Научная статья

УДК 656.61.052.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.026>

## Сравнение методов сглаживания по данным эксперимента на модели

А.С.Васьков<sup>1</sup> as.vaskov@mail.ru, А.А.Мироненко<sup>2</sup> alex\_mironenko@mail.ru<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова<sup>2</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова

**Аннотация.** При автоматизации многих задач судовождения критична качественная обработка измеряемой информации о параметрах движения подвижного объекта (судна). В практике судовождения распространенным приемом предварительной обработки серии измерений является их сглаживание. Для повышения точности и достоверности измерений/вычислений выполнены натурные измерения на специально сконструированной физической модели судна и бортового информационно-измерительного модуля. Проведен детальный критический анализ алгоритмов предварительной обработки информации, на примере получения истинного курса модели судна. Серия проведенных экспериментов включала временные ряды измерений с последующим сглаживанием различными алгоритмами, как в статичном положении модели судна, так и при различных режимах движения (прямой курс, маневры, циркуляции). На основании полученных данных и результатов моделирования предложен новый вариант сглаживания, в виде скользящего среднего из скользящих средних исходных измерений и средних, взятых после первого осреднения по трем точкам. Полученные серии сглаженных измерений предложенным новым методом, в сравнении с другими алгоритмами, лучше компенсирует погрешности, соответствует характеру физических процессов и обладает большей гладкостью. Предполагаемая модель сглаживания может служить математической основой проектирования информационно-измерительных комплексов подвижных объектов и их оптимизации.

**Ключевые слова:** модель судна, судовождение, измерения, сглаживание, скользящее среднее, среднее средних, моделирование.

**Для цитирования:** Васьков А.С., Мироненко А.А. Сравнение методов сглаживания по данным эксперимента на модели, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 198—204.

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.026>

## Smoothing methods comparison on the model's experimental data

Anatoliy S. Vas'kov<sup>1</sup> as.vaskov@mail.ru, Aleksandr A. Mironenko<sup>2</sup> alex\_mironenko@mail.ru<sup>1</sup>Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Russian Federation,<sup>2</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The automation of various navigation tasks requires the high-quality preprocessing of the measured vessel's motion parameters. The smoothing of the measurement series is the common preprocessing technique in the navigation practice. To improve the accuracy and reliability of the data the full-scale measurements on a specially designed vessel's physical model have been performed. A detailed analysis of some preliminary processing algorithms has been carried out on the basis of the obtaining the true course of the vessel's model. The experiments have included the series of measurements and subsequent smoothing of the data by various algorithms as in static position of the vessel's model so during the movement. Due to the obtained data and the simulation results a new algorithm of smoothing based on a running average approach over three points has been designed. The results of the measurements data smoothing by new method compensate the errors better, correspond to the physical processes and have greater smoothness in comparison with other algorithms. The assumed smoothing algorithm may be used as the mathematical model for designing the information-measuring complexes of the moving objects and their optimization.

**Key words:** vessel model, navigation, measurements, smoothing, running average, mean of mean, modeling.

**For citation:** Anatoliy S. Vas'kov, Aleksandr A. Mironenko, Smoothing methods comparison on the model's experimental data, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 198—204.

### Введение

Анализ современных исследований [8, 10, 14, 15] показывает, что создание безэкипажных судов один из главных проектов морской индустрии 21 века, а значит появляются новые перспективные задачи. Например, разработка морских интеллектуальных технопарков (акваторий) [1]. Учитывая перспективность разработок по данному направлению [1, 8, 10, 12, 14, 15] изготовлена модель

судна [6], поддерживающая разнообразные принципы управления судном.

Из работ [2, 6, 12] следует, что для автоматизации большинства задач судовождения критична качественная обработка информации о параметрах движения подвижного объекта (судна). Например, угловая скорость вращения, текущий истинный курс, вектор направления движения, продольная и поперечная составляющие скорости, координаты местоположения, ускорения прямоугольных координат, а также заданные параметры движения

(физически реализуемый маршрут со скоростным режимом).

Для решения основных задач по управлению сконструированной моделью судна бортовой информационно-измерительный модуль/блок принимает и обрабатывает измерения/данные от следующих датчиков/сенсоров: 3-х осевого гироскопа-акселерометра; модуля часов реального времени; двух разнесенных в диаметральной плоскости GPS модулей; 3-х осевого магнитометра; датчика поворота руля; датчика частоты вращения винта.

### Принципы измерения истинного курса

В настоящей статье рассматривается сравнение функционирования некоторых алгоритмов сглаживания измерений на примере получения истинного курса модели судна.

В состав бортового информационно-измерительного модуля входит функционально-измерительный модуль GY-273 QMC 5883 – 3-х осевой магнитометр, обеспечивающий измерение составляющих проекции магнитного поля Земли по 3-м осям в системе координат магнитометра [11, 13].

Численные значения проекций магнитного поля Земли на оси X и Y, полученные при нахождении информационно-измерительного модуля в плоскости истинного горизонта, дают возможность рассчитать направление на северный магнитный полюс и решить проблему определения магнитного курса, а при известных значениях склонения и магнитной девиации – истинного курса модели:

$$\psi_M = a \tan(m_X / m_Y); \quad (1)$$

$$\psi = \psi_M + d + \delta, \quad (2)$$

где  $\psi_M$  – магнитный курс;  $\psi$  – истинный курс;  $m_X, m_Y$  – проекции магнитного поля Земли на оси X, Y соответственно;  $d$  – магнитное склонение,  $\delta$  – девиация.

Для повышения точности и достоверности измерений/вычислений, выполняемых информационно-измерительным модулем, требуется критический анализ алгоритмов предварительной обработки данных, включающий:

- исключение систематических погрешностей;
- уменьшение воздействия случайных погрешностей (помех/шумов);
- комплексную обработку информации.

### Принципы предварительной обработки измерений

Локальные внешние воздействия на направление вектора магнитного поля Земли приводят к асимметричности в измерениях магнитометра рис.1 и как следствие – к погрешностям в расчете направления на магнитный полюс.

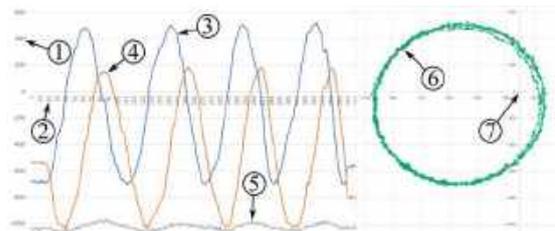


Рис. 1. Исходные измерения магнитометра в процессе устранения девиации

1 – значения составляющих магнитного поля Земли; 2 – номера измерений; 3, 4, 5 – составляющие по осям X, Y, Z, соответственно, при повороте магнитометра вокруг оси Z, 6 – распределение измерений магнитометра по осям X, Y в плоскости истинного горизонта, 7 – начало системы координат XOY.

Предварительная обработка измерений магнитометра включает следующую последовательность [5, 11]:

1. Уничтожение полукруговой, четвертной девиаций.
2. Устранение креновой девиации.
3. Учет несовпадения географического и магнитного полюсов (2).

Имеющая систематический характер полукруговая девиация устраняется поправками за смещение измерений магнитометра относительно нуля (см. рис. 1), рис.2:

$$m_X^h = m_X + \Delta m_X;$$

$$m_Y^h = m_Y + \Delta m_Y;$$

$$m_Z^h = m_Z + \Delta m_Z; \quad (3)$$

$$\Delta m_X = 0,5(m_X^{max} - m_X^{min}) - m_X^{min};$$

$$\Delta m_Y = 0,5(m_Y^{max} - m_Y^{min}) - m_Y^{min};$$

$$\Delta m_Z = 0,5(m_Z^{max} - m_Z^{min}) - m_Z^{min},$$

где  $m_X^h, m_Y^h, m_Z^h$  – показания магнитометра, исправленные за смещение;  $\Delta m_X, \Delta m_Y, \Delta m_Z$  – поправки за смещение по осям X, Y, соответственно;  $m_X^{min}, m_Y^{min}, m_Z^{min}, m_X^{max}, m_Y^{max}, m_Z^{max}$  – минимальные и максимальные значения.

Для устранения четвертной девиации, искажающей форму магнитного поля [10], рассчитываются нормирующие множители:

$$\eta_{m_X} = \frac{m_X^{max} - m_X^{min}}{m_X^{max} - m_X^{min}};$$

$$\eta_{m_Y} = \frac{m_Y^{max} - m_Y^{min}}{m_Y^{max} - m_Y^{min}}; \quad (4)$$

$$\eta_{m_Z} = \frac{m_Z^{max} - m_Z^{min}}{m_Z^{max} - m_Z^{min}};$$

где  $\eta_{m_x}, \eta_{m_y}, \eta_{m_z}$  — нормирующие множители по осям  $X, Y$  соответственно;  $m^{max}, m^{min}$  — максимальное и минимальное значения по оси с наибольшими разностями в значениях.

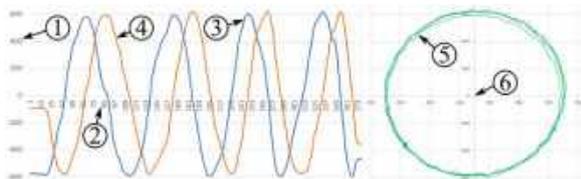


Рис.2. Устранение полукруговой девиации магнитометра

1 – численные значения составляющих магнитного поля Земли; 2 – порядковый номер измерения; 3, 4 – составляющие по осям  $X, Y$ , соответственно, при повороте магнитометра вокруг оси  $Z$ , 5 – распределение измерений магнитометра по осям  $X, Y$  в плоскости истинного горизонта, 6 – начало системы координат  $XOY$ .

Тогда выражение для исправления показаний магнитометра принимает вид:

$$\begin{aligned} m_x^c &= m_x^b \eta_{m_x} = (m_x + \Delta m_x) \eta_{m_x}; \\ m_y^c &= m_y^b \eta_{m_y} = (m_y + \Delta m_y) \eta_{m_y}; \\ m_z^c &= m_z^b \eta_{m_z} = (m_z + \Delta m_z) \eta_{m_z}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m_x^c, m_y^c, m_z^c$  — исправленные измерения магнитометра.

Креновая девиация – поправка за отклонение плоскости установки магнитометра (за счёт крена/дифферента модели) от плоскости истинного горизонта компенсируется умножением исправленных измерений (5) на матрицу поворота:

$$C = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & -\cos \theta \cos \psi \cos \varphi & \sin \theta \cos \psi \sin \varphi + \cos \theta \sin \psi \\ -\cos \varphi \sin \psi & \cos \theta \sin \psi \sin \varphi + \sin \theta \cos \psi & -\sin \theta \sin \psi \sin \varphi + \cos \theta \cos \psi \\ \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi & -\sin \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (6)$$

где  $\varphi, \theta, \psi$  – углы (Эйлера) ориентации (дифферента, крена, курса) судовых осей координат, относительно неподвижных.

### Алгоритмы сглаживания

Распространенным приемом предварительной обработки серии измерений является их сглаживание [3, 9, 17], в практике применяются различные алгоритмы, некоторые приведены ниже:

Скользящее среднее:

$$\hat{x}_i = \frac{\sum_{j=i-k}^{j=i+k} x_j}{2k+1}, \quad (7)$$

где  $i$  – порядковый номер скользящего среднего;  $\hat{x}_i$  – численное значение скользящего среднего;  $x_j$  –  $j$ -е измерение в интервале сглаживания;  $2k+1$  – длина интервала сглаживания.

Взвешенное скользящее среднее:

$$\hat{x}_i = \frac{\sum_{j=i-k}^{j=i+k} p_j x_j}{\sum_{j=i-k}^{j=i+k} p_j}, \quad (8)$$

где  $p_j$  – весовые коэффициенты.

Экспоненциальное сглаживание:

$$\hat{x}_i = x_i + k_e (\hat{x}_{i-1} - x_i) \quad (9)$$

где  $k_e$  – параметр сглаживания ( $0 < k_e < 1$ ).

Медианное сглаживание:

$$\hat{x}_i = \text{median}(x_{i-k}, \dots, x_i, \dots, x_{i+k}), \quad (10)$$

где  $2k$  – интервал сглаживания;  $i$  – позиция элемента.

Взвешенный медианный фильтр:

$$\hat{x}_i = \text{median}(p_{i-k} \circ x_{i-k}, \dots, p_i \circ x_i, \dots, p_{i+k} \circ x_{i+k}), \quad (11)$$

где  $\circ$  – оператор повтора.

Экспоненциальный фильтр с адаптивным шагом [17]

$$\begin{aligned} \hat{x}_i &= k_m x_i + (1 - k_m) \hat{x}_{i-1}; \\ k_m &= \frac{1}{1 + \exp(\beta + \alpha \gamma)}; \\ \gamma &= \frac{x_i - \hat{x}_i}{(x_{i-1} - \hat{x}_i)^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\alpha, \beta$  – константы, определяющие смещение (минимальное значение  $k_m$ ) и коэффициент наклона).

Также применялись другие методы адаптации среднего весового, экспоненциального и  $\alpha$ - $\beta$ -фильтров, полученные авторами [3] по текущим измерениям методом наименьших квадратов.

В рамках настоящего исследования по сравнению функционирования различных алгоритмов сглаживания проведена серия экспериментов на разработанной модели судна как в неподвижном ее положении, так и при различных режимах движения, а именно: вращение по/против часовой стрелки, продольные/поперечные и произвольные перемещения.

На основании полученных данных и результатов моделирования предложен новый вариант сглаживания в виде скользящего среднего из скользящих средних исходных измерений и средних после первого осреднения:

$$\hat{x}_{i+1} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sum_{j=i-1}^{j=i+1} x_j}{3} + \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + \frac{\hat{x}_{i-1} + \hat{x}_i}{2} \right] + \frac{\hat{x}_i - \hat{x}_{i-1}}{2}. \quad (13)$$

Половины разностей в выражении (13) приводят средние значения к моменту последнего измерения и частично компенсируют повторяющиеся погрешности. Этот вариант показал наилучшее качество сглаживания.

### Сравнение алгоритмов сглаживания

Проведенная серия экспериментов включала собственно измерения, последующую обработку различными алгоритмами сглаживания и последующее сравнения результатов.

Результаты работы некоторых алгоритмов сглаживания представлены на графиках рис.1-6, средние квадратические погрешности (СКП) сведены в табл.1 для наглядного сравнения.

Таблица 1

Погрешности расчетов $m_x$ и $m_y$ , истинного курса						
Алгоритм сглаживания	СКП $m_x$	$\Delta_{пр} m_x$	СКП $m_y$	$\Delta_{пр} m_y$	$\psi, \circ$	$\Delta_{пр} \psi, \circ$
Исходные данные	7,2	21,6	6,9	20,7	0,64	1,92
Скользящее среднее	4,1	12,3	4,0	12,0	0,36	1,08
Экспоненциальное	3,1	9,3	2,9	8,7	0,26	0,78
Медианное	4,6	13,8	4,8	14,4	0,5	1,6
Среднее средних (13)	3,7	11,1	3,5	10,6	0,3	0,9

Например, следующие результаты получены при расположении модели судна в неподвижном положении.

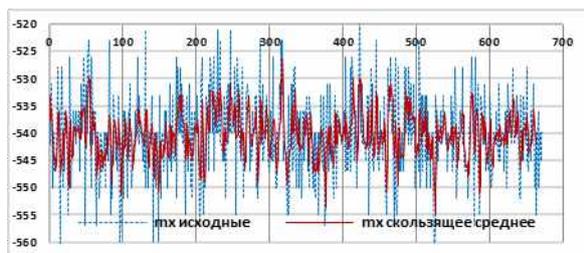


Рис.3. Сглаживание скользящим средним ИК – истинный курс модели судна.

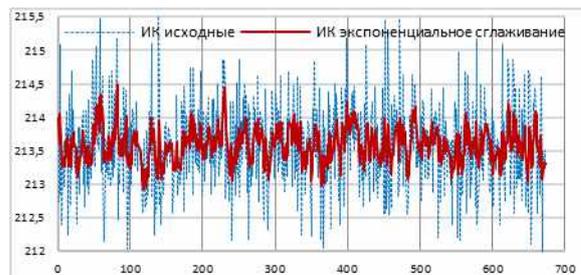
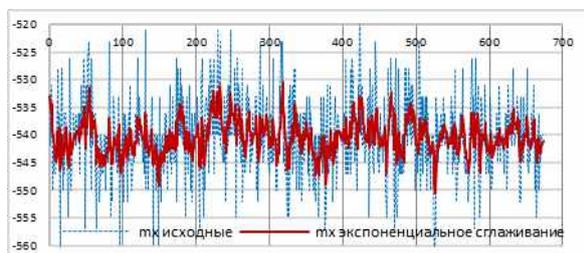


Рис.4. Экспоненциальное сглаживание.

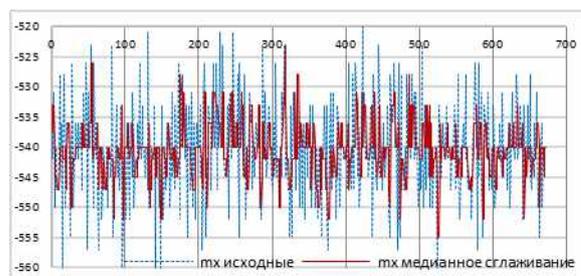


Рис.5. Медианное сглаживание.

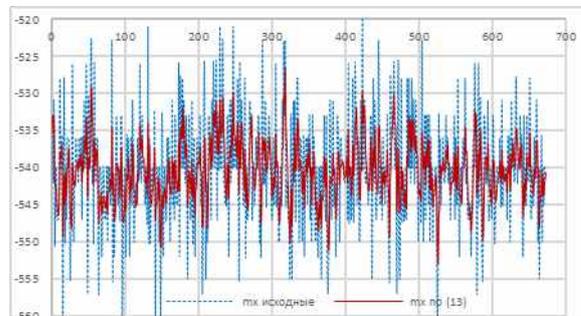
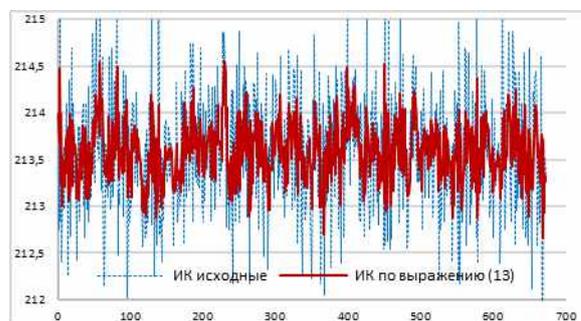


Рис.6. Сглаживание по выражению (13).



Результаты сравнения алгоритмов сглаживания при вращении модели судна в плоскости истинного горизонта относительно вертикальной оси:

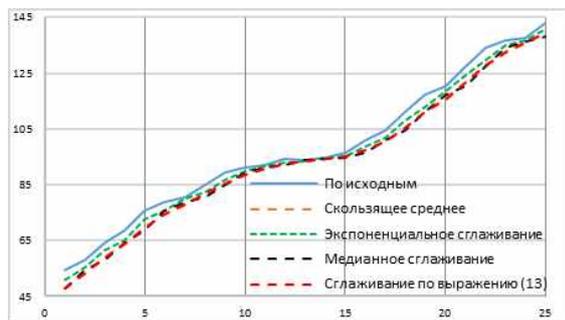


Рис. 7. Результаты сглаживания истинного курса.

Следующие выводы можно сделать на основании проведенных экспериментов и результатов моделирования – при отсутствии движения модели судна в расчете истинного курса большую погрешность дают методы скользящей средней и медианный (СКП 0,36° и 0,5° соответственно), для увеличения точности результатов необходимо увеличение интервала расчета. Алгоритмы экспоненциального сглаживания и среднее из средних (13) позволяют добиться лучшего результата сглаживания (СКП 0,26° и 0,3° соответственно).

По данным экспериментов и результатам моделирования установлено, что при расчете истинного курса модели в процессе движения (вращения) все рассмотренные алгоритмы выдают результат с некоторым запаздыванием, очевидно из рис. 7.

В заключении следует отметить, что кривая, соответствующая изменению  $\psi$ , рассчитанная по (13) обладают большей гладкостью и тенденцией в характере, характеризующем процесс поворота модели судна.

#### Учет запаздывания в расчете $\psi$

Для учета запаздывания в расчете  $\psi$  в процессе движения модели судна (вращения), на основе результатов проведенных экспериментов и моделирования, предлагается ввести в расчёт  $\psi$  данные об измеренной угловой скорости поворота. Для этих целей в состав информационно-измерительного модуля модели судна входит 3-х осевой гироскоп-акселерометр GY-521 MPU 6050. Гироскоп-акселерометр GY-521 MPU 6050 позволяет оценить перемещение подвижного объекта (модели судна) в пространстве, в частном случае на плоскости, а именно оценить угловую скорость и линейные ускорения [11, 16]. Тогда окончательное значение  $\psi$  определяется суммой сглаженных, например по выражению (13), значений  $\psi$  и угловой скорости поворота ( $r$ ):

$$\hat{\psi}_m = \hat{\psi}_c + r dt, \quad (14)$$

где  $r$  – угловая скорость поворота, °/s;  $dt$  – интервал между измерениями;  $\hat{\psi}_c$  – сглаженное значение истинного курса.

Результаты расчётов по (14) в неподвижном положении модели судна и в процессе движения (вращения) приведены ниже, в виде графиков.

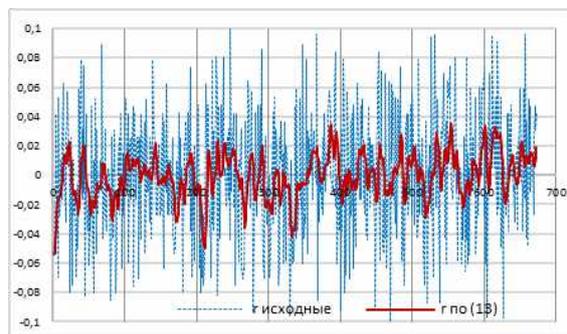


Рис. 8. Сглаживание угловой скорости поворота.

СКП  $r$  по исходным данным составила 0,04 °/s, предельная 0,12 °/s соответственно, по результатам сглаживания по выражению (13) СКП уменьшилась до 0,01 °/s, предельная 0,03 °/s.

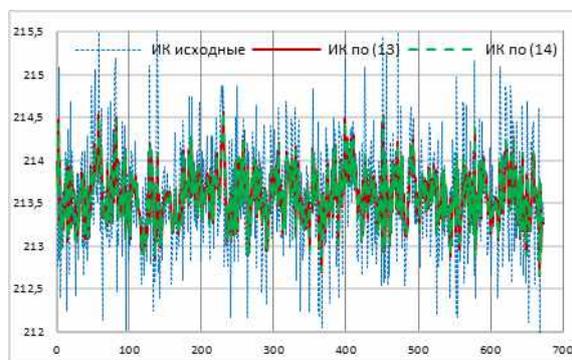


Рис. 9. Расчет  $\psi$  по (13), (14).

СКП и предельная погрешности при расчете  $\psi$  по выражению (14) практически не изменились и составили 0,3° и 0,9° соответственно.

Далее приводятся результаты сглаживания угловой скорости поворота и расчёта  $\psi$ , полученные в ходе проведенного эксперимента при вращении модели судна в плоскости истинного горизонта относительно вертикальной оси.

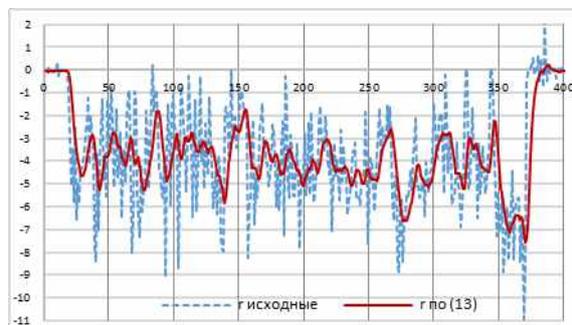


Рис. 10. Результаты сглаживания угловой скорости поворота.

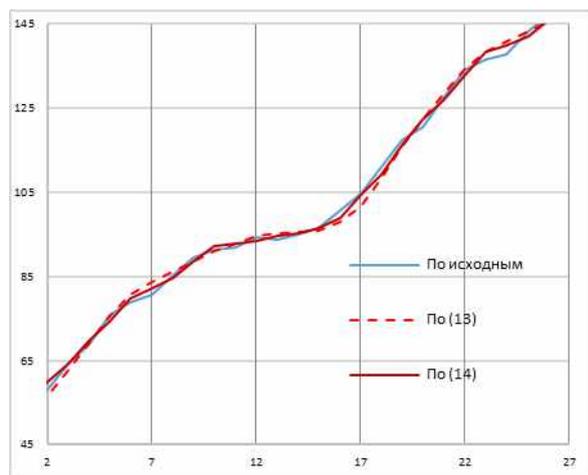


Рис.11. Результаты расчёта  $\psi$ .

### Заключение

На основании проведённых экспериментов и результатов моделирования следует, что при отсутствии движения модели судна в расчете

истинного курса лучшие результаты показали экспоненциальное сглаживание и среднее из средних (13). Если подвижный объект находится в движении (вращении – для расчета ИК), все рассмотренные алгоритмы выдают результат с некоторым запаздыванием. Для улучшения точности расчета истинного курса по скользящему среднему или медианному сглаживанию возможно увеличение интервала расчета. Это справедливо для состояния модели судна без движения, в процессе движения и изменении соответствующего параметра (для истинного курса – вращение) это приведет к еще большему запаздыванию расчета текущего значения.

Следует отметить, что кривая, соответствующая характеру изменения  $\psi$ , рассчитанная по (13) обладают большей гладкостью и тенденцией, характеризующей процесс поворота модели судна, поэтому предлагается сглаживание измерений ( $\psi$ ,  $\gamma$ ) выполнять по выражению (13), а текущее значение  $\psi$  рассчитывать по выражению (22).

### Литература

1. Безбородов Г.И., Исмагилов М.И. От стратегии е-Навигации к концепции и-Акватории. Морской вестник. 2017. № 1(61). С. 77 – 81.
2. Васьков А.С., Мироненко А.А. Принципы задания и отслеживания физически реализуемого маршрута. XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Сб. тр. XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. ИПУ им. В.А.Трапезникова РАН. М. 2019. С.1394-1399. DOI 10.25728/vspu. 2019.1394.
3. Васьков А.С., Грищенко А.А. Сопровождение параметров траектории движения судна. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4 (46). Т.3. С.77 – 82.
4. Использование измерительной системы MPU 6050 для определения угловых скоростей и линейных ускорений. Д.С.Федоров [и др.]. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1(11). С. 75 – 80.
5. Кожухов В.П., Воронов В.В., Григорьев В.В. Девиация магнитного компаса. М.: Транспорт, 1971. 240 с.
6. Меньшенин О.И. Васьков А.С. Основы построения систем автоматического управления движением судна. М.: В/О «Мортехинформреклама», 1985. 76 с.
7. Мироненко А.А. Прототип судна-робота. Эксплуатация морского транспорта. 2018. № 2(87). С. 46 – 52.
8. Распоряжение Правительства РФ от 29.03. 2018 N 534-р «О плане мероприятий ("дорожной карте") по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной технологической инициативы по направлению "Маринет"». <http://static.government.ru/media/files/bU3BQV5QiFnsT95KYqoz4eRSdoNM6ewk.pdf>
9. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971.192 с.
10. Спасский Б.А. Автономные безэкипажные корабли военного и двойного назначения. Робототехника и техническая кибернетика. 2014. №3(4). С. 9 – 16.
11. Сытник А.А., Гончаров А.В., Раевский Н.В. Компенсация влияния дестабилизирующих факторов в процессе определения составляющих магнитного поля Земли с помощью магнитометрических датчиков. Вестник науки ТГУ. 2014. №4(30). С.44 – 52.
12. Ченский Д.А., Григорьев К.А., Ченский А.Г. Информационно-управляющая система безэкипажного автоматизированного катамарана. Подводные исследования и робототехника. 2017. №1(23). С. 50 – 56.
13. 3-Axis Magnetic Sensor QMC5883L Datasheet (PDF). <http://wiki.epalsite.com/images/7/72/QMC5883L-Datasheet-1.0.pdf>
14. Being a Responsible Industry: An Industry Code of Practice. Maritime Autonomous Surface Ships up to and including 24 metres in length. Published by the Society of Maritime Industries on behalf of Maritime. UK. 2017. 84 p.
15. Global Marine Technology Trends 2030. Lloyd's Register, QinetiQ and University of Southampton. UK. 2015. 188 p. <http://www.ukmarinealliance.co.uk>.
16. MPU-6050 Datasheet (PDF): List of Unclassified Manufacturers. <https://www.best-microcontroller-projects.com/support-files/qmc5883l-datasheet-1.0.pdf>
17. Taylor J.W. Smooth Transition Exponential Smoothing. Journal of Forecasting. 2004. Vol. 23. pp. 385 – 394.

### References

1. Bezborodov G.I., Ismagilov M.I. Ot strategii e-Navigacii k koncepcii i-Akvatorii. Morskoj vestnik [From e-Navigation strategy to i-Aquatory concept]. 2017. №1(61). S.77 – 81.

2. Vas'kov A.S., Mironenko A.A. Principy zadaniya i otslezhivaniya fizicheski relizuemogo marshruta [The principles of planning and tracking a physically released route]. XIII Vserossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019: Sb. Tr. XIII Vserossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019. IPU im. V.A. Trapeznikova RAN. M. 2019. S.1394-1399. DOI 10.25728/vspu.2019.139.
3. Vas'kov A.S., Grishchenko A.A. Soprovozhdenie parametrov traektorii dvizheniya sudna. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Support tracking of parameters of the vessels movement]. 2019. № 4 (46). T.3. S.77 – 82.
4. Ispol'zovanie izmeritel'noj sistemy MPU 6050 dlya opredeleniya uglovyh skorostej i linejnyh uskorenij [Using of Measuring System MPU6050 for the Determination of the Angular Velocities and Linear Accelerations]. D.S. Fedorov [and others]. Avtomatika i programmaya inzheneriya. 2015. № 1(11). S. 75 – 80.
5. Kozhuhov V.P., Voronov V.V., Grigor'ev V.V. Deviaciya magnitnogo kompasa [Magnetic compass deviation]. M.: Transport, 1971. 240 s.
6. Men'shenin O.I., Vas'kov A.S. Osnovy postroeniya sistem avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna [The fundamentals of the vessel's automatic control systems construction]. M.: V/O «Mortekhinformreklama», 1985. 76 s.
7. Mironenko A.A. Prototip sudna-robota [The prototype of the robot-vessel]. Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2018. № 2(87). S. 46 – 52.
8. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 29.03.2018 N 534-r «O plane meropriyatij ("dorozhnoj karte") po sovershenstvovaniyu zakonodatel'stva i ustraneniyu administrativnyh bar'erov v celyah obespecheniya realizacii Nacional'noj tekhnologicheskoy iniciativy po napravleniyu "Marinet"» [The order of the Russian Federation Government 29 March 2018. N 534-p «The action plan ("Road map") Improvement of the legislation and elimination of administrative barriers in order to ensure the implementation of the National Technological Initiative in "Marinet" initiative]. <http://static.government.ru/media/files/bU3BQV5QiFnsT95KYqoz4eRSdoNM6ewk.pdf>
9. Rumshiskij L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta [Mathematical preprocessing of experimental results]. M.: Nauka, 1971. 192 s.
10. Spasskij B.A. Avtonomnye bezekipazhnye korabli voennogo i dvojnogo naznacheniya [Autonomous unmanned surface vehicles for military and dual application]. Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2014. №3(4). S. 9 – 16.
11. Sytnik A.A., Goncharov A.V., Raevskij N.V. Kompensaciya vliyaniya destabiliziruyushchih faktorov v processe opredeleniya sostavlyayushchih magnitnogo polya Zemli s pomoshch'yu magnetometricheskikh datchikov [Compensation of destabilizing factors influence in the process of determination of the Earth magnetic field components using the magnetometer sensors]. Vestnik nauki TGU. 2014. №4(30). S.44 – 52.
12. CHenskij D.A., Grigor'ev K.A., CHenskij A.G. Informacionno-upravlyayushchaya sistema bezekipazhnogo avtomatizirovannogo katamarana [Remote control automatic system (RCAS) of unmanned surface vehicle]. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2017. №1(23). S. 50 – 56.
13. 3-Axis Magnetic Sensor QMC5883L Datasheet (PDF) [3-Axis Magnetic Sensor QMC5883L Datasheet]. <http://wiki.epalsite.com/images/7/72/QMC5883L-Datasheet-1.0.pdf>.
14. Being a Responsible Industry: An Industry Code of Practice. Maritime Autonomous Surface Ships up to and including 24 metres in length. Published by the Society of Maritime Industries on behalf of Maritime, UK. 2017. – 84 p.
15. Global Marine Technology Trends 2030. Lloyd's Register, QinetiQ and University of Southampton, UK, 2015. 188 p. <http://www.ukmarinealliance.co.uk>
16. MPU-6050 Datasheet (PDF): List of Unclassified Manufacturers. <https://www.best-microcontroller-projects.com/support-files/qmc5883l-datasheet-1.0.pdf>
17. Taylor J.W. Smooth Transition Exponential Smoothing. Journal of Forecasting. 2004. Vol. 23, pp. 385 – 394.

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

**Анатолий Семенович Васьков**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Судовождение, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 393524, Краснодарский край, г.Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: as.vaskov@mail.ru

**Anatoliy S. Vas'kov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, Russian Federation, e-mail: as.vaskov@mail.ru

**Александр Анатольевич Мироненко**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Навигации, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: alex\_mironenko@mail.ru

**Aleksandr A. Mironenko**, Dr. Sci. (Eng), assistant Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, Russian Federation, Saint-Petersburg, Dvinskaya st., 5/7, e-mail: alex\_mironenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.07.2022

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.07.2022

Принята к публикации/accepted for publication 26.07.2022

Научная статья

УДК 534.23

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.027>

## Обнаружение и идентификация малозумного движущегося источника на фоне шумов ближнего судоходства в мелком море

Б.А. Касаткин<sup>1</sup> [kasatkas@marime.febras.ru](mailto:kasatkas@marime.febras.ru), Н.В. Злобина<sup>1</sup> [zlobina@marine.febras.ru](mailto:zlobina@marine.febras.ru),  
С.Б. Касаткин<sup>1</sup> [bigcezar@mail.ru](mailto:bigcezar@mail.ru)

<sup>1</sup>Институт проблем морских технологий ДВО РАН

**Аннотация.** В статье получено модельное описание звуковых полей в волноводе жидкий слой – твердое полупространство в диапазоне частот, меньших первой критической частоты модельного волновода. Выполнено экспериментальное исследование звуковых полей в скалярно-векторном описании, создаваемых движущимся малозумным источником, в присутствии интенсивных шумов ближнего судоходства. Для обнаружения малозумного источника на фоне шумов ближнего судоходства использована вертикальная приемная система, оснащенная комбинированными приемниками, помехоустойчивость которых существенно увеличена использованием алгоритмов обработки по полному набору информативных параметров, характеризующих скалярно-векторную структуру звукового поля. Выполнена верификация модельного описания путем сравнения параметров вертикальной структуры звуковых полей с экспериментальными данными. Для обнаружения и идентификации малозумного движущегося источника в звуковом диапазоне частот использованы параметры инвариантной структуры звукового поля, соответствующей движению источника. Выполнен спектральный анализ дискретных составляющих вально-лопастного звукоряда малозумного источника, подтвердивший его обнаружение на всем интервале наблюдения.

**Ключевые слова:** комбинированный гидроакустический приемник, шумовое поле, инвариант, информативные параметры, инфразвук, мелкое море

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках государственного задания ИПМТ ДВО РАН

**Для цитирования:** Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Обнаружение и идентификация малозумного движущегося источника на фоне шумов ближнего судоходства в мелком море, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 205—211.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.027>

## Detection and identification of a low-noise moving source against the background of noise from short-range shipping in shallow sea

Boris A. Kasatkin<sup>1</sup> [kasatkas@marime.febras.ru](mailto:kasatkas@marime.febras.ru), Nadezhda V. Zlobina<sup>1</sup> [zlobina@marine.febras.ru](mailto:zlobina@marine.febras.ru),  
Sergey B. Kasatkin<sup>1</sup> [bigcezar@mail.ru](mailto:bigcezar@mail.ru)

<sup>1</sup>Institute of marine technology problems FEB RAS, Russian Federation

**Abstract.** The article provides a model description of sound fields in a waveguide consisting of a liquid layer and a solid half-space in the frequency range below the first critical frequency of the model waveguide. An experimental study of sound fields in a scalar-vector description, created by a moving low-noise source, in the presence of intense short-range navigation noise, has been carried out. A vertical receiving system equipped with combined receivers is used to detect a low-noise source against the background of short-range shipping noise. Noise immunity of receivers is significantly increased by using processing algorithms for a full set of informative parameters characterizing the scalar-vector structure of the sound field. The model description is verified by comparing the parameters of the vertical structure of sound fields with experimental data. The parameters of the invariant structure of the sound field corresponding to the movement of the source are used to detect and identify a low-noise moving source in the sound frequency range. A spectral analysis of the discrete components of the shaft-blade sound scale of a low-noise source was performed, which confirmed its detection over the entire observation interval.

**Keywords:** combined sonar receiver, noise field, invariant, informative parameters, infrasound, shallow sea

**Financial Support:** The study was carried out within the framework of the state assignment of IMTP FEB RAS

**For citation:** Boris A. Kasatkin, Nadezhda V. Zlobina, Sergey B. Kasatkin. Detection and identification of a low-noise moving source against the background of noise from short-range shipping in shallow sea, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 205—211.

### Введение

При проведении экспериментальных исследований звуковых полей в реальных условиях морского эксперимента негативную роль играют шумы ближнего судоходства, уровень которых, как правило, существенно превышает уровень полезных сигналов, подлежащих измерению приемной

системой. Для эффективного приема слабых сигналов на фоне изотропной составляющей шумовой помехи необходимо увеличивать помехоустойчивость приемной системы, желательно, без увеличения ее апертуры, что крайне важно при работе в инфразвуковом диапазоне частот. Наибольшая помехоустойчивость в этом случае реализуется при использовании в качестве

приемной системы комбинированных приемников (КП) и алгоритмов обработки полного набора информативных параметров, характеризующих скалярно-векторную структуру звукового поля. Полный набор 16 параметров, характеризующих скалярно-векторную структуру звукового поля, был представлен в работе [1] в виде компонент тензора второго ранга – тензора плотности потока мощности. Примеры использования эквивалентного набора из 16 информативных параметров для повышения помехоустойчивости КП приведены в работах [2 – 4].

Цель настоящей работы заключается в разработке адекватного модельного описания звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот и разработке технологии обнаружения и идентификации малошумного источника на фоне анизотропной помехи с использованием точечной приемной системы, оснащенной КП. Для решения этой задачи использованы особенности инвариантной структуры изолиний равной интенсивности (ИРИ) в звуковом поле движущегося источника в звуковом диапазоне частот и особенности спектра дискретных составляющих вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР) в инфразвуковом диапазоне частот.

**1. Особенности модельного описания звуковых полей инфразвукового диапазона**

При возбуждении звуковых полей инфразвукового диапазона в системе вода – морское дно существенно увеличивается глубина проникновения звуковой волны в донное полупространство, в модельном описании которого необходимо учитывать сдвиговую упругость. Классическое решение граничной задачи (ГЗ) для такого волновода, предполагает самосопряженную модельную постановку. В этой модельной постановке на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода, звуковое поле представлено одной регулярной неоднородной волной Рэлея – Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно.

Обобщенное решение ГЗ, полученное в несамосопряженной модельной постановке, подробно описано в работах [2 – 4]. В обобщенном решении звуковое поле описывается собственными функциями двух сопряженных операторов, расходящимися волнами и сходящимися волнами отдачи, связанными механизмом трансформации на горизонтах трансформации. В результате на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода, звуковое поле представлено парой неоднородных волн, регулярной волной Рэлея

– Шолте, локализованной на границе раздела, и обобщенной (гибридной) волной Шолте, локализованной на горизонте источника. Обобщенная волна Шолте соответствующая обобщенному решению характеристического уравнения для границы раздела жидкого и твердого полупространств, описана в работах [5, 6].

В работе [7] в уточненное решение ГЗ, описывающее звуковое поле в инфразвуковом диапазоне частот, включена также неоднородная обобщенная (гибридная) волна Рэлея – Шолте, локализованная на горизонте полного внутреннего отражения  $z=z_1$  в полупространстве. Функции поперечного сечения для тройки неоднородных волн, формирующих звуковое поле на частотах, меньших первой критической частоты, поясняются рис. 1.

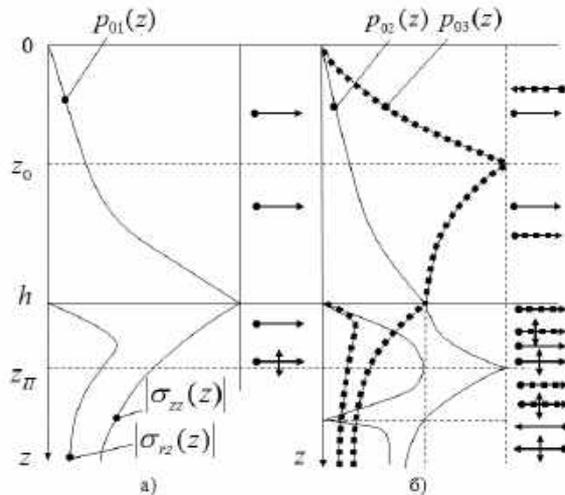


Рис.1. Функции поперечного сечения (а), (б) мод нулевого порядка  $p_{01}(z)$ ,  $p_{02}(z)$ ,  $p_{03}(z)$

На рис. 1 функция  $p_{01}(z)$  относится к неоднородной регулярной волне Рэлея – Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно. Функция  $p_{02}(z)$  относится к неоднородной обобщенной волне Рэлея – Шолте, локализованной на горизонте полного внутреннего отражения  $z=z_1$  в полупространстве. Функция  $p_{03}(z)$  относится к неоднородной обобщенной волне Шолте, локализованной на горизонте источника.

Обобщенное решение ГЗ для такого волновода поясняется рис. 2 для приповерхностного источника, подробности обобщенного решения ГЗ приведены в работе [7]. На рис. 2 все функции, характеризующие энергетическую структуру звукового поля, умножены на радиальную координату  $r$  для исключения цилиндрической расходимости потоков мощности и нормированы на свое максимальное значение.

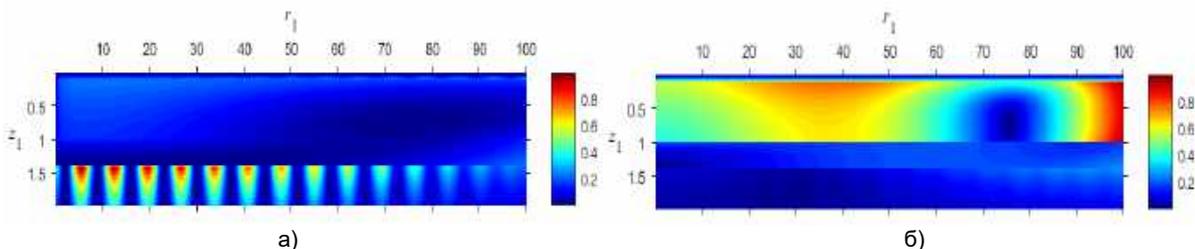


Рис. 2. Обобщенное решение (жидкий слой - твердое полупространство); а)  $p^2(r,z)$ , б)  $|l(r,z)|$ ;  $k_1 h = 0,25$ ;  $z_{01} = 0,1$

Пространственные координаты нормированы на глубину волновода  $h$ . На рис. 2а хорошо видна зона минимума звукового давления, соответствующая узлу звукового давления.

Кроме того, в поле вектора интенсивности формируются седловые точки, соответствующие нулю вектора интенсивности. Узловые и седловые точки в интерференционной структуре звукового поля получили название дислокаций фазового фронта [8]. Важно отметить, что локализация звукового поля на горизонте источника непосредственно связана с обобщенной волной Шолте, которая отсутствует в классическом решении граничной задачи. Принципиальное отличие вертикальной структуры скалярных и векторных полей в классическом и обобщенном решении заключается именно в дополнительной локализации векторного поля вблизи горизонта источника. При

увеличении расстояния максимум звукового поля смещается на границу раздела вода – морское дно, что экспериментально подтверждено в работах [3, 4]. Поскольку вертикальные структуры звукового поля в классическом и обобщенном решении отличаются принципиально [3, 4], этот факт можно использовать для идентификации модовой структуры звукового поля, сформированного неоднородными волнами в реальном морском эксперименте, и верификации самих модельных решений. Наибольшее различие модельных решений проявляется не только в вертикальной структуре звуковых полей, но и в присутствии вихревых структур в обобщенном решении. На рис. 3 показаны вихревые структуры в окрестности дислокаций фазового фронта, узловой точки с координатами  $(r_1=75; z_1=0,77)$  и седловой точки с координатами  $(r_1=75,5; z_1=0,73)$ .

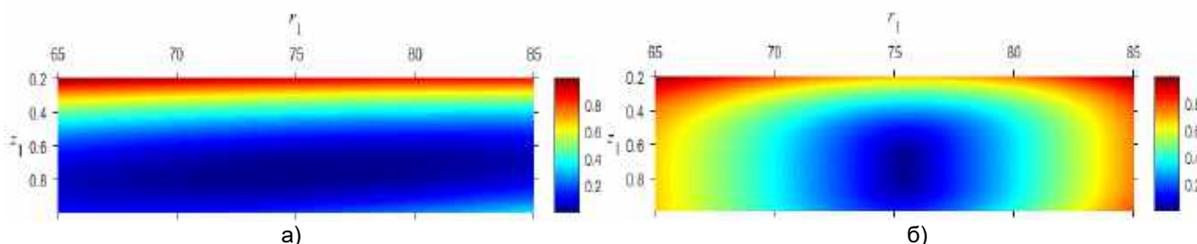


Рис. 3. Вихревая структура звукового поля; а) окрестность узловой точки в поле звукового давления, б) окрестность седловой точки в поле вектора интенсивности;  $k_1 h=0,25; z_0=0,1$

В классическом решении звуковое поле на этих частотах описывается одной неоднородной волной Рэлея – Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно, а вихревые структуры в звуковом поле в этом диапазоне частот отсутствуют.

## 2. Особенности эксперимента и обработки сигналов

Эксперимент проводился на акватории Уссурийского залива в августе 2021 г. при наличии интенсивных шумов ближнего судоходства. В качестве источника сигнала использовались дискретные составляющие вально-лопастного звуоряда (ВЛЗР) и шумы обтекания научно-исследовательского судна-катамарана (НИС) «Юрий Молоков». В качестве приемной использована вертикально ориентированная 3-х элементная система, модули которой были оснащены КП. Глубина моря в месте постановки приемной системы составляла 48 м, приемные модули ПМ-1, ПМ-2, ПМ-3 располагались на глубине  $z_1=18$  м,  $z_1=28$  м,  $z_1=38$  м соответственно. В качестве источника анизотропной

помехи выступали проходящие суда, уровень шума которых существенно превышал уровень шумов катамарана.

Схема маневрирования НИС «Юрий Молоков» относительно приемной системы показана на рис. 4. Максимальное удаление катамарана от приемной системы составляло 5,6 км. На первом этапе процедуры обнаружения можно использовать фактор движения катамарана вблизи приемной системы, который формирует инвариантную структуру звукового поля в виде изолиний равной интенсивности (ИРИ). Однако система ИРИ в звуковом поле катамарана будет отличаться от системы ИРИ для судов ближнего судоходства, формирующих анизотропную помеху. Соответствующие 3D сонограммы (в координатах частота, время наблюдения, уровень в дБ) для суммарного звукового поля сигнал плюс помеха (S+N) на выходе канала звукового давления для ПМ-1 представлены на рис. 5 в полосе частот 300–1000 Гц.



Рис. 4. Схема маневрирования НИС «Юрий Молоков» относительно приемной системы ПМ123

На трассе №1 катамаран удаляется от приемной системы. Поскольку инвариант пространственно-интерференционной структуры звукового поля, определенный в работе [9], в звуковом диапазоне частот принимает положительное значение, близкое к единице ( $\beta=1$ ), то частота максимума спектральной плотности мощности (СПМ) на ИРИ увеличивается с увеличением расстояния между источником шума (катамараном) и приемной системой.

На трассе №2 катамаран проходит курсом 270° через траверзную точку в момент времени 14 ч. 05 мин, а затем сближается с приемной системой. Соответствующая сонограмма для этой трассы представлена на рис. 5б. На сонограмме хорошо видна траверзная точка, в окрестности которой формируется подошва гиперболических ИРИ с последующим уменьшением частоты максимума СПМ на ИРИ при сближении катамарана с приемной системой. Инвариантная структура звукового поля, которая проявляется в характерной геометрии ИРИ, служит признаком обнаружения малошумного объекта на этих трассах. Трасса №3 соответствует полному времени наблюдения. Уровень анизотропной помехи в средней части интервала наблюдения на 20–25 дБ превышает уровень шумов катамарана, что исключает обнаружение малошумного источника. Для обнаружения малошумного источника на всем интервале наблюдения необходимо перейти к спектральному анализу дискретных составляющих ВЛЗР в инфразвуковом диапазоне частот.

На этом этапе суммарный процесс ( $S+N$ ) разделяется на сигнал  $S$  и помеху  $N$ . Здесь под помехой понимается уровень суммарного процесса, усредненный в частотной области достаточно широким окном Хэмминга. Затем методами спектрального анализа вычисляется полный набор информативных параметров, характеризующих скалярно-векторную структуру звукового поля:

$$A_1 = \rho^2, A_2 = l_{1x}, A_3 = l_{1y}, A_4 = l_{1z}, A_5 = l_{2x},$$

$$A_6 = l_{2y}, A_7 = l_{2z}, A_8 = \text{rot}_x \bar{l}, A_9 = \text{rot}_y \bar{l},$$

$$A_{10} = \text{rot}_z \bar{l}, A_{11} = g_{1x}^2, A_{12} = g_{1y}^2, A_{13} = g_{1z}^2,$$

$$A_{14} = g_{2x}^2, A_{15} = g_{2y}^2, A_{16} = g_{2z}^2,$$

где  $l = l_1 + il_2$  – комплексный вектор интенсивности,  $g = g_1 + ig_2$  – комплексный вектор градиента давления.

Эти параметры эквивалентны, но не равны тождественно параметрам тензора плотности потока мощности, введенного в работе [1]. Подробное описание методики обработки содержится в работах [2 – 4]. По результатам обработки вычисляются сонограммы для отношения  $S/N$  по каждому информативному параметру, а в блоке обработки сигналов (БОС), который играет роль компаратора, выбираются максимальные отношения  $(S/N)_{\max}$  из полного набора отношений, по которым вычисляется итоговая сонограмма. Результаты такой обработки представлены на рис. 6, 7. Рис. 6 поясняет сонограммы звукового поля для отношения  $S/N$  на выходе канала звукового давления. На рис. 7 показаны сонограммы для отношения  $S/N$  на выходе БОС. Можно отметить эффективность обработки всей скалярно-векторной информации, которая позволяет увеличить потенциальную помехоустойчивость КП до 20–25 дБ. Постоянство выявленных дискретных составляющих ВЛЗР на всем интервале наблюдения свидетельствует о том, что они принадлежат одному и тому же источнику. Выявленные дискретные составляющие 1,4 Гц, 2,1 Гц, 2,8 Гц неплохо соответствуют гармоникам первой вальной частоты 0,7 Гц и принадлежат катамарану, идущему со скоростью 2–3 узла.

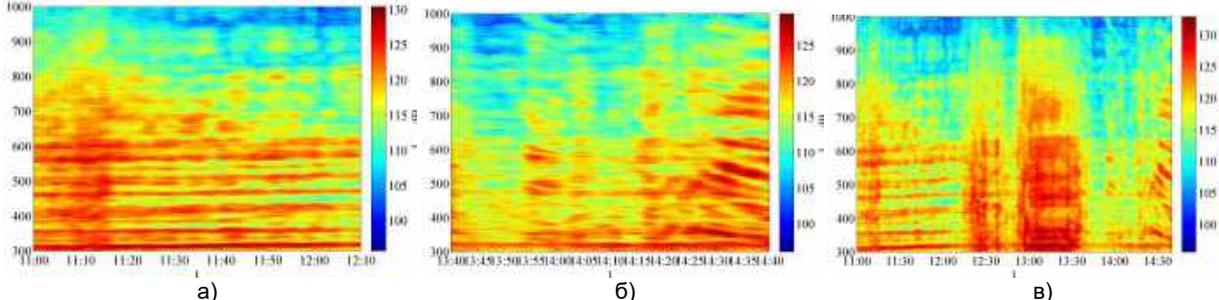


Рис. 5. Сонограммы для ( $S+N$ ), ПМ-1; а) трасса №1, б) трасса №2, в) трасса №3

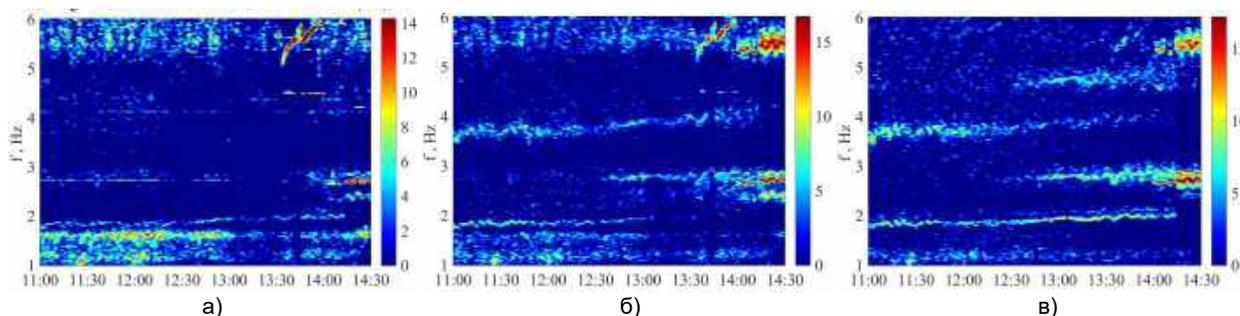


Рис. 6. Сонограммы для отношения  $S/N$  по параметру  $A_1$ ; а) ПМ-1, б) ПМ-2, в) ПМ-3; трасса №3

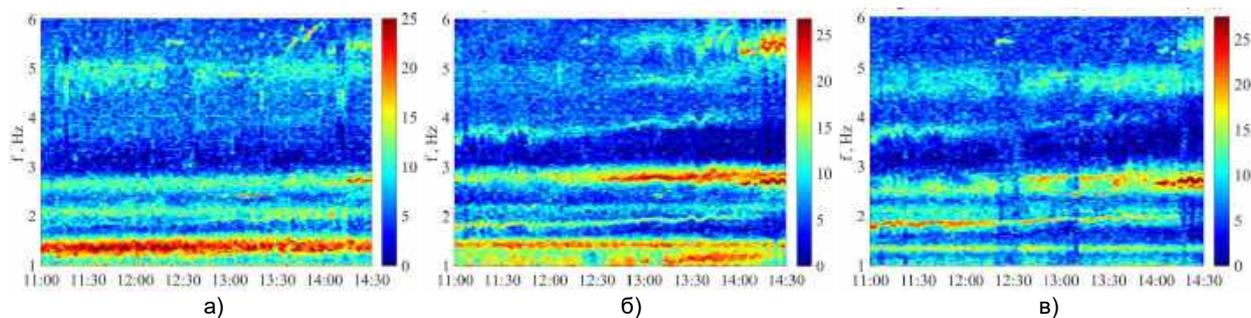


Рис. 7. Сонограммы для отношения  $S/N$  на выходе БОС; а) ПМ-1, б) ПМ-2, в) ПМ-3, трасса №3

Для выяснения связи вертикальной структуры звукового поля с модельным описанием был выполнен анализ вертикальной структуры всех векторных полей, участвующих в формировании звукового поля в скалярно-векторном описании в сравнении с вертикальной структурой скалярного поля звукового давления. Вертикальная структура  $x$ -компоненты вещественной составляющей вектора интенсивности поясняется рис.8. Следует отметить, что пространственные структуры скалярного поля звукового давления и поля вектора интенсивности в дальней зоне источника, расположенного в свободном пространстве, практически совпадают. В отличие от условий свободного пространства, вектор интенсивности в звуковом поле, сформированном в волноводе, приобретает вихревую составляющую.

Можно предположить, что именно вихревая составляющая вектора интенсивности, впервые обнаруженная экспериментально в работах [10, 11], является причиной выявленных отличий. Кроме того, вихревая составляющая вектора интенсивности является характерным признаком обобщенного решения, в котором звуковое поле формируется

тремя неоднородными волнами. В классическом решении звуковое поле формируется одной неоднородной волной, а вихревая составляющая в однододовом поле отсутствует. Для проверки этой гипотезы был выполнен подробный анализ вертикальной структуры вихревого вектора – ротора вектора интенсивности.

Сонограммы звукового поля для  $y$ -компоненты этого вектора поясняются рис. 9. Следует отметить, что вертикальная структура вихревого вектора подобна вертикальной структуре вектора интенсивности. Суммарное векторное поле содержит также поле потенциального вектора – вектора градиента давления, вертикальная структура которого также подобна вертикальной структуре вектора интенсивности. Эпюры вертикального распределения отношения  $S/N$  для звукового давления и модуля соответствующих векторов представлены на рис. 10. Можно отметить, что вертикальные структуры всех составляющих суммарного векторного поля подобны и хорошо соответствуют модельному описанию.

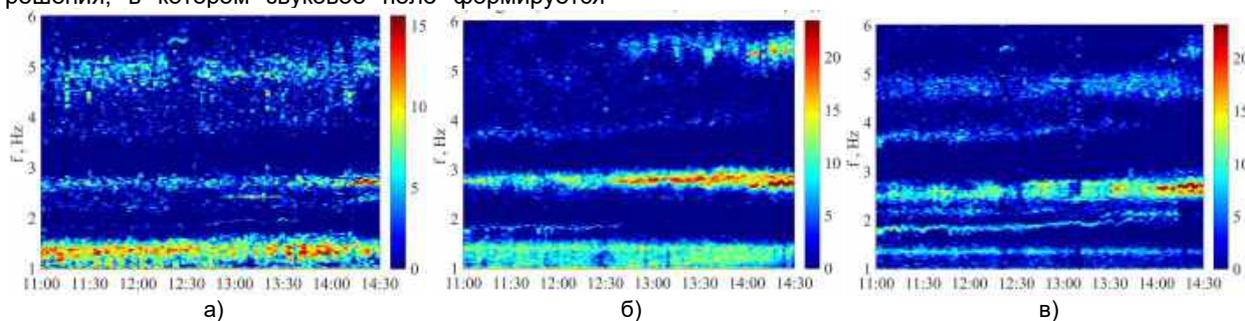


Рис. 8. Сонограммы для отношения  $S/N$  по параметру  $A_2$ ; а) ПМ-1, б) ПМ-2, в) ПМ-3, трасса №3

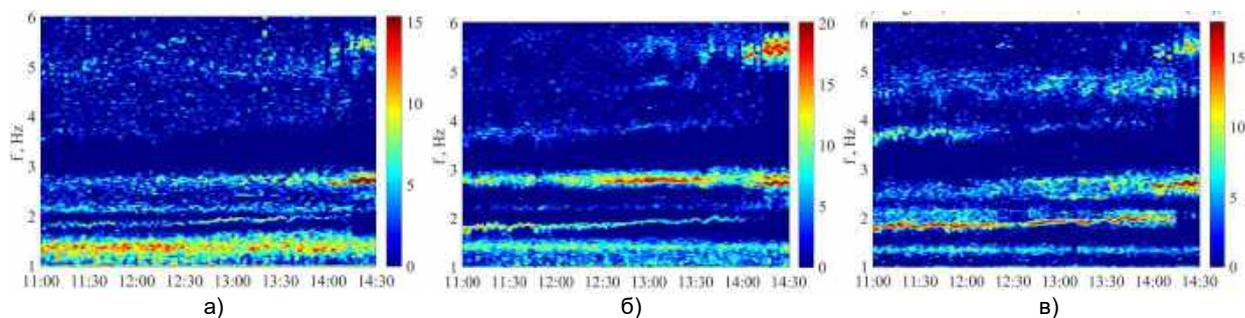


Рис. 9. Сонограммы для отношения  $S/N$  по параметру  $A_3$ ; а) ПМ-1, б) ПМ-2, в) ПМ-3, трасса №3

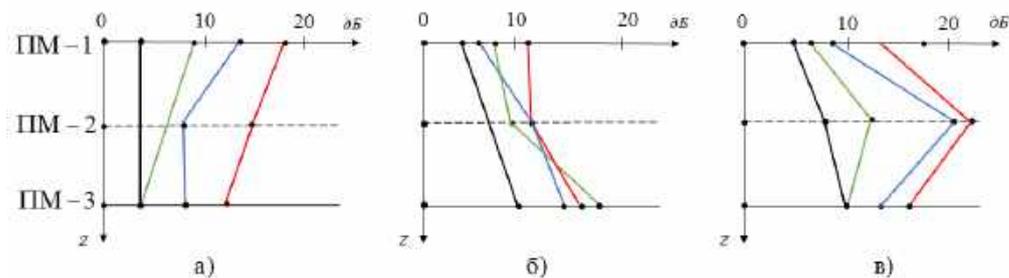


Рис. 10. Эпюры вертикального распределения отношения  $S/N$  для звукового давления (черный), модуля вещественной составляющей вектора интенсивности (зеленый), модуля ротора вектора интенсивности (синий) и модуля вектора градиента давления (красный); а)  $f=1,4$  Гц, б)  $f=2,1$  Гц, в)  $f=2,8$  Гц

### Заключение

Выполнено модельное и экспериментальное исследование вертикальной структуры звукового поля в скалярно-векторном описании, создаваемого малозумным источником, на фоне интенсивных шумов ближнего судоходства. Использование в эксперименте вертикально ориентированной антенны, состоящей из комбинированных приемников, позволило значительно повысить помехоустойчивость приемной системы и получить надежные оценки вертикальной структуры скалярного поля давления и трех векторных полей, формирующих суммарное векторное поле в инфразвуковом диапазоне частот. Отмечено

соответствие вертикальной структуры скалярных и векторных полей обобщенному решению. Зарегистрированные в эксперименте инвариантные соотношения и их проявления в звуковом диапазоне частот использованы для обнаружения и идентификации малозумного движущегося источника на фоне интенсивных шумов ближнего судоходства. Идентификация шумящего объекта произведена по скорости его движения. Спектральные характеристики дискретных составляющих ВЛЗР в инфразвуковом диапазоне частот подтверждают обнаружение малозумного источника на всем интервале наблюдения.

### Литература

1. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 479 с.
2. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Акустика мелкого моря в скалярно-векторном описании. Теория и эксперимент. Владивосток, 2019. 360 с.
3. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Скалярно-векторная структура и кинематические характеристики звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т.14, № 3. С. 71-85.
4. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Модельное описание и экспериментальное исследование звуковых полей инфразвукового диапазона в мелком море (обзор) // *Подводные исследования и робототехника*. 2021. № 3(37). С. 59-72.
5. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106(2). P. 666-673.
6. Ansell J.H. The roots of the Stoneley wave equation for liquid-solid interfaces. *Pure Appl. Geophys.* 1972. V. 194. P. 172-188.
7. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Пограничные волны в проблеме обнаружения подводных источников шума // *Подводные исследования и робототехника*. 2019. № 4(30). С. 37-48.
8. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. О мощности, излучаемой акустическим источником в океаническом волноводе // *Акуст. журн.* 1987. Т. 33, № 6. С. 1051-1056.
9. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. *Акустика океана. Современное состояние*. М.: Наука, 1982. С. 71-91.
10. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // *Акуст. журн.* 2011. Т. 57, № 6. С. 837-843.
11. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 54-57.

### References

1. Gordienko V.A. Vektorno-fazovye metody v akustike [Vector-phase methods in acoustics]. M., izd. Fizmatlit, 2007. 479 s.
2. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B., Zlobin D.V., Kosarev G.V. Shallow sea acoustics in scalar-vector description. Theory and experiment. Vladivostok, 2019. 360 p.
3. Kasatkin B.A., Kasatkin S.B. Scalar-vector structure and kinematic characteristics of the sound field in the infrasonic frequency range. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021. V. 14, No 3. P. 71-85.
4. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B. Model description and experimental research of sound fields in the infrasonic range in a shallow sea (Review). *Underwater Investigations and Robotics*. 2021. No 3(37). P. 59-72.

5. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid. J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 106(2). P. 666-673.
6. Ansell J.H. The roots of the Stoneley wave equation for liquid-solid interfaces. Pure Appl. Geophys. 1972. V. 194. P. 172-188.
7. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B. Border waves in the problem of detecting underwater noise sources. Underwater Investigations and Robotics. 2019. No 4(30). P. 37-48.
8. Zhuravlev V.A., Kobozev I.K., Kravtsov Yu.A. О moshchnosti, izluchaemoy akusticheskim istochnikom v okeanicheskom volnovode [On the power emitted by an acoustic source in oceanic waveguide]. Akust. zhurn. 1987. T. 33, № 6. S. 1051-1056.
9. Chuprov S.D. Interferentsionnaya struktura zvukovogo polya v sloistom okeane. Akustika okeana. Sovremennoe sostoyanie [Interference structure of the sound field in layered ocean. Ocean acoustics. Modern state]. M., izd. Nauka, 1982. S.71-91.
10. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortex properties of the acoustic intensity vector in a shallow sea. Acoustical Physics. 2011. V. 57. No 6. P. 851-856.
11. Shchurov V.A. Vector acoustics of the ocean. Vladivostok, izd. Dalnauka, 2006. 297 p.

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

**Борис Анатольевич Касаткин**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690091, Владивосток, ул. Суханова, д. 5а, e-mail: kasatkas@marine.febras.ru

**Boris A. Kasatkin**, Dr. Sci. (Phys& Math), Professor, Chief researcher, Institute of marine technology problems FEB RAS, Sukhanov Str., 5a, Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: kasatkas@marine.febras.ru

**Надежда Владимировна Злобина**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690091, Владивосток, ул. Суханова, д. 5а, e-mail: zlobina@marine.febras.ru

**Nadezhda V. Zlobina**, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Institute of marine technology problems FEB RAS, Sukhanov Str., 5a, Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: zlobina@marine.febras.ru

**Сергей Борисович Касаткин**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690091, Владивосток, ул. Суханова, д. 5а, e-mail: bigcezar@mail.ru

**Sergey B. Kasatkin**, Ph.D. (Phys& Math), Leading researcher, Institute of marine technology problems FEB RAS, Sukhanov Str., 5a, Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: bigcezar@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 10.06.2022.

Научная статья

УДК 656.6.058

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.028>

## Оценка экологической безопасности водной транспортировки грузов

В.Ю. Каминский<sup>1</sup> Kaminskyvy@yandex.ru, Д.А. Скороходов<sup>1</sup> skorohodda@mail.ru,  
Е.Ю. Кузнецова<sup>1</sup> helhena@mail.ru

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

**Аннотация.** Существенное влияние на экологическую обстановку оказывают аварии и инциденты при перевозке различных грузов водным транспортом. Оценка экологической безопасности водной транспортировки грузов относится к классу многокритериальных задач, которые могут быть решены в рамках методов построения обобщённого показателя. В рамках одного из подобных методов осуществляется формирование обобщённой функции желательности Харрингтона, обладающей свойствами непрерывности, монотонности, гладкости. В соответствии с принятой классификацией грузов по способу их транспортировки в статье предложен аналитический инструментарий оценки экологической безопасности водной перевозки грузов. Особое внимание уделяется возможному нарушению герметичности корпуса судна при перемещении жидких грузов и потере остойчивости вследствие смещения груза. Показано, что экологическую безопасность транспортировки по величине напряжений на корпусе судна и с учётом допустимой остойчивости в условиях волнения моря загруженного судна можно оценить с помощью функции Харрингтона с отрицательным градиентом. Для грузов, опасных возможностью разжижения, а также несмещаемых грузов, экологическая безопасность определяется аддитивной функцией полезности, состоящей из двух составляющих, имеющих одинаковый коэффициент важности, а для грузов с опасностью смещения безопасность оценивается функцией полезности из трёх составляющих. В статье предложены аналитические зависимости для оценки экологической безопасности перевозки зерна, хлопка, леса, нефтепродуктов, сжиженного газа.

**Ключевые слова:** водный транспорт, классификация грузов, мониторинг нагрузок, метacentрическая высота, остойчивость, аддитивная функция полезности, безопасность.

**Для цитирования:** Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Кузнецова Е.Ю. Оценка экологической безопасности водной транспортировки грузов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 212—219.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.028>

## Assessment of environmental safety of water transportation of goods

Valery Yu. Kaminsky<sup>1</sup> Kaminskyvy@yandex.ru, Dmitriy A. Skorokhodov<sup>1</sup> skorohodda@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

**Abstract.** Accidents and incidents during the transportation of various cargoes by water transport have a significant impact on the environmental situation. The assessment of the environmental safety of water transportation of goods belongs to the class of multi-criteria tasks that can be solved within the framework of methods for constructing a generalized indicator. Within the framework of one of these methods, a generalized Harrington desirability function is formed, which has the properties of continuity, monotony, smoothness. In accordance with the accepted classification of goods by the method of their transportation, the article offers analytical tools for assessing the environmental safety of water transportation of goods. Particular attention is paid to the possible violation of the tightness of the vessel's hull during the movement of liquid cargo and loss of stability due to cargo displacement. It is shown that the environmental safety of transportation by the magnitude of stresses on the hull of the vessel and taking into account the permissible stability in conditions of sea waves of a loaded vessel can be estimated using the Harrington function with a negative gradient. For goods dangerous with the possibility of liquefaction, as well as non-displaced goods, environmental safety is determined by an additive utility function consisting of two components having the same importance coefficient, and for goods with a danger of displacement, safety is assessed by a utility function of three components. The article offers analytical dependencies for assessing the environmental safety of transportation of grain, cotton, timber, petroleum products, liquefied gas.

**Keywords:** water transport, cargo classification, load monitoring, metacentric height, stability, additive utility function, safety.

**For citation:** Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Elena Y. Kuznetsova, Assessment of environmental safety of water transportation of goods, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 212—219.

### Введение

Для водной транспортировки грузов существуют различные типы судов, учитывающие особенности груза: балкеры, контейнеровозы, ролкеры, лихтеровозы, рефрижераторные суда, танкеры и др.

Специализированные суда имеют индивидуальные эксплуатационные особенности, что требует от экипажа специальной дополнительной подготовки по приобретению определенных навыков для сохранной перевозки груза, а также обеспечения безопасности экипажа и судна в течение рейса.

Принята следующая классификация грузов исходя из способа их транспортировки [1, 2]: штучные, навалочные, насыпные и наливные.

Штучные грузы часто называют генеральными. Генеральные (общие) грузы - это оборудование, контейнеры, накатная техника, железобетонные конструкции, металлопродукция, пакетированные грузы, тарно-штучные грузы, крупногабаритные и тяжеловесные грузы, лес и пиломатериалы. Они состоят из отдельных упакованных либо неупакованных грузовых мест. Их особенностью является то, что на судне одновременно можно перевозить мелкие партии различных видов грузов.

К навалочным грузам относятся грузы, перевозимые без тары, навалом: руда, уголь, соль, зерно и т. д. Перевозка навалочных грузов связана с определенной опасностью, которая может быть вызвана смещением груза к борту и образованием крена судна, разжижением и перетеканием груза к борту, самонагреванием и самовозгоранием, повышенной концентрацией в грузовых помещениях ядовитых или взрывоопасных газов, пониженным содержанием кислорода в трюмном воздухе. Выделяют режимные грузы, для перевозки которых требуется поддержание заданного температурного, влажностного и вентиляционного режимов. Режимные грузы делятся на категории: не скоропортящиеся, скоропортящиеся, которые, в свою очередь, включают грузы мороженные, охлажденные, грузы, не требующие жесткого температурного режима, а также грузы, требующие вентиляции. Наиболее распространенные режимные грузы: фрукты, овощи, мясо и мясопродукты, рыба и морепродукты.

Опасные грузы перевозятся в соответствии с правилами перевозок опасных грузов. Грузы повышенной опасности допускаются к перевозке по специальным разрешениям. К перевозке опасных грузов могут быть допущены суда, имеющие соответствующую запись в квалификационном свидетельстве.

Перевозки наливных грузов, в отличие от перевозок навалочных и штучных грузов – это один из самых сложных видов перевозок, который требует строгого соблюдения установленных норм и правил транспортировки и хранения - от подготовки специального транспорта (цистерн, танк-контейнеров и т.д.), до требований к отдельным категориям жидкостей. Очень часто перевозки наливных грузов сопровождаются дополнительными ограничениями, такими как, температурный режим, химическая активность, опасность и т.д. Наливные грузы включают нефть и нефтепродукты, сжиженные газы, вредные жидкие вещества.

Рассмотрим отдельные виды грузов и оценим экологическую безопасность их транспортировки.

### Перевозка навалочных грузов

Навалочные грузы (полезные ископаемые, строительные материалы, сырьё и пр.) перевозят без тары – навалом. К подобным грузам относят зерно, руду, рудные концентраты, уголь, цемент, песок, соль, почву, торф, удобрения, сахар-сырец, жидкие пищевые продукты и т.д.). Такой груз состоит из однородных или неоднородных частиц, подвижность которых характеризуется величиной угла естественного откоса и величиной сопротивления

сдвигу. Сопротивление сдвигу складывается из сопротивления трению твёрдых частиц груза между собой по поверхности скольжения и сопротивления связности, которое определяется силами сцепления частиц.

Навалочные грузы перевозятся балкерами [3]. Балкеры - однопалубные суда, которые отличаются большой грузоподъемностью (около 150 тыс. т) и небольшой скоростью хода. Трюмы балкеров имеют наклонные стенки (нижняя и верхняя часть), для самораспределения сыпучего груза. Большинство балкеров не имеют погрузочных устройств и загружаются с помощью портовой погрузочной техники. Некоторые балкеры оснащают ленточными транспортерами, которые выгружают из трюма груз (саморазгружающиеся суда).

Перевозка навалочных грузов сопряжена с риском возникновения опасных явлений: подвижкой груза («сухое смещение»), его разжижением и перетеканием, самосогреванием и самовозгоранием, образованием в грузовых помещениях ядовитых, взрывчатых газов, обеднением кислородом трюмного воздуха, быстрой коррозией металла, нарушением местной или продольной прочности судна. Следствием подобных явлений может стать нарушение герметичности судна или его опрокидывание, что чревато выходом в акваторию перевозимого груза [4].

Все навалочные грузы разделены на две группы. Группу А составляют грузы, опасные возможностью разжижения. Разжижение – это явление, при котором твердые насыпные грузы переходят из твердого состояния в состояние, приближающееся к жидкому. Например, железорудная мелочь, никелевая руда и различные минеральные концентраты представляют собой материалы, которые могут стать жидкими.

Во вторую группу, группу АС, входят грузы, обладающие потенциальной опасностью «сухого смещения», самосогревания, самовозгорания, выделения взрывчатых или ядовитых газов, (табл.1) [4].

Таблица 1

Группа	A	АС			
Подгруппа	00	0	1	2	3

В табл.1 использованы следующие обозначения: 00 – наразжижаемость груза заведомо не обеспечена; 0 – груз с опасной возможностью «сухого смещения»; 1 – груз с возможностью смещения подобно смещению зерна (плавное перетекание); 2 – груз, несмещаемость которого обеспечена соблюдением требований типового плана загрузки (ТПЗ); 3 – груз, несмещаемость которого обеспечена при любых условиях.

Экологическую безопасность транспортировки подобных грузов определяют либо нарушение герметичности судна при разжижении груза либо потеря устойчивости в результате снижения метацентрической высоты вследствие смещения груза, вызвавшего опасный крен. На волнении спровоцированная грузом начальная деформация возрастает и может стать опасной, особенно при попадании корпуса с начальным прогибом на подошву волны, а с исходным перегибом на вершину волны. Поэтому эксплуатация судна в рейсе сопровождается контролем общей прочности судна.

На современных судах реализуется следующая аппаратная конфигурация системы мониторинга нагрузок. [5,6]:

- датчики напряжений на корпусе,
- акселерометр для измерения вертикального ускорения на носу судна,
- два акселерометра в центральной части судна для измерения ускорений бортовой качки и поперечного смещения,
- микропроцессор,
- дисплей для представления информации датчиков и результатов ее обработки в удобном для оператора виде,
- устройство хранения данных для их накопления с целью статистической обработки.

Датчики напряжений устанавливаются на главной палубе около каждого грузового трюма и в местах возникновения максимальных сил сжатия и растяжения при общем продольном изгибе корпуса судна для характеристики напряжённо-деформированного состояния палубы в процессе рейса и в ходе погрузочно-разгрузочных работ.

Микропроцессор предназначен для интерпретации сигналов датчиков, сравнения их с допустимыми значениями, одобренными национальной Администрацией. Рекомендуется соединять микропроцессор с компьютером для расчета погрузки с целью получения сведений о фазе погрузочных или разгрузочных операций (начальная, промежуточная, конечная). Процессор с помощью звуковых и визуальных средств должен сообщать о высоких уровнях нагрузки на корпусе, приближающихся к пороговым значениям.

Измерители напряжений на главной палубе учитывают температурный эффект и вырабатывают информацию о текущем и среднем значениях нагрузки в месте их установки.

Экологическую безопасность транспортировки груза, связанную с величиной напряжений на корпусе судна, можно оценить по функции Харрингтона с отрицательным градиентом:

$$E_{H\sigma} = \exp\left(-\exp(-k(\sigma_{max} - \sigma_i))\right), \quad (1)$$

где  $k = \frac{6}{\sigma_{max} - \sigma_{min}}$ ;  $\sigma_{max}$  – максимальное значение напряжения корпуса судна;  $\sigma_{min}$  – минимальное напряжение корпуса порожнего судна;  $\sigma_i$  – текущее напряжение корпуса, в зависимости от груза, связанное с общим продольным изгибом и кручением корпуса на волнении.

Наличие датчиков напряжения позволяет исключить сложные вычисления по оценке величины напряжения в зависимости от загрузки трюмов. После проведения погрузочных операций выполняется построение оперативных диаграмм по нагрузке судна. Проверяется прочность в тех сечениях корпуса, где могут возникнуть наибольшие напряжения. До выхода судна в море в соответствии с нагрузкой трюмов контролируется общая прочность корпуса.

До начала операций по погрузке (выгрузке) на судно массивного груза ( $m$ ) (более 10% водоизмещения ( $D$ )) определяют осадку судна и возвышение метацентра ( $Z_m$ ) при известных из документации на судно (не загруженное)

возвышении центра тяжести ( $Z_g$ ) и метацентрической высоте ( $h$ ). Затем определяют возвышение центра тяжести после загрузки ( $Z'_g$ ) и соответствующее возвышение метацентра ( $Z'_m$ ). После этого рассчитывают метацентрическую высоту загруженного судна  $h_g = Z'_m - Z'_g$ .

Плавная качка обеспечивается соотношением  $\frac{h_g}{B} = 0,1$ . Тогда предпочтительное значение  $h_g$  определяется выражением

$$h_g = 0,1 \cdot B, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина судна, м.

Известно, что при перевозке навалочных грузов основной задачей является обеспечение покоя сыпучего груза при качке, которое выполняется при соблюдении следующего условия.

$$h_g \leq \frac{0,15 \cdot B^2 \cdot (\tan \alpha \cdot \cos \theta - \sin \theta)}{\theta \cdot (z + 0,5 \cdot B \cdot \tan \alpha)}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол естественного смещения груза, рад;  $\theta$  – амплитуда бортовой качки, рад;  $z$  – возвышение поверхности груза над центром тяжести судна, м.

Отметим,  $\alpha_{max}$  – максимальный угол смещения груза, вызванного волнением моря, составляет 15° для заполненного отсека и 25° – для отсека, заполненного частично.

Таким образом безопасность транспортировки навалочных грузов в условиях волнения моря обеспечивается условием нахождения метацентрической высоты в границах значений по формулам (2) и (3).

Оценим эффективность экологической безопасности транспортировки навалочных грузов в условиях морского волнения с помощью функции Харрингтона с отрицательным градиентом:

$$E_{Hh} = \exp\left(-\exp(-k(h_{opt} - h_i))\right), \quad (4)$$

где  $k = \frac{6}{h_{opt} - h_{кр}}$ ,  $h_{opt}$  – оптимальное значение метацентрической высоты на волнении, определяемое по формуле (3),  $h_{кр}$  – критическое значение метацентрической высоты судна на волнении, определяемое по формуле (2).

Для навалочных грузов из подгрупп 00, 2 и 3 (см. табл.1), когда несмещаемость груза обеспечена, оценка экологической безопасности транспортировки будет определяться аддитивной функцией полезности, состоящей из двух составляющих, имеющих одинаковый коэффициент важности:

$$E_{H00,2,3} = \frac{1}{2}(E_{H\sigma} + E_{Hh}). \quad (5)$$

Для грузов из подгрупп 0 и 1, когда смещение груза при качке возможно, оценка экологической безопасности будет определяться аддитивной функцией полезности, состоящей из трёх составляющих, имеющих одинаковый коэффициент важности:

$$E_{H0,1} = \frac{1}{3}(E_{H\sigma} + E_{Hh} + E_{H\theta}). \quad (6)$$

$$E_{H\theta} = \exp\left(-\exp(-k(\theta_{max} - \theta_i))\right), \quad (7)$$

где  $k = \frac{6}{\theta_{max} - \theta_{min}}$ ,  $\theta_{max}$  – критическое значение статического крена при смещении груза на волнении, (для навалочных грузов 12°);  $\theta_{min}$  – минимальное

значение статического крена при загрузке судна,  $\theta_i$  - текущее значение статического крена судна, вызванного смещением груза на волнении.

### Перевозка зерновых грузов

Водная перевозка зерновых грузов в контейнерах - основной вид транспортировки зерна. Это объясняется невысокими тарифами на перевозки водным транспортом. Подобные перевозки зерновых грузов – это возможность доставить большой объем товара на большие расстояния. В отличие от автомобильных перевозок, водные – более продолжительные по срокам, и требующие выполнения условий безопасного хранения зерна при транспортировке.

В каждом, даже заполненном грузовом помещении, имеются подпалубные пустоты. Их величина нормируется, следовательно, может быть нормирована и величина предполагаемого кренящего момента, а вместе с тем и остойчивость судна. Остойчивость должна удовлетворять следующим требованиям:

- после приложения условного кренящего момента, вызванного смещением зерна, угол статического крена не должен превышать  $12^\circ$ ;
- остаточная площадь диаграммы статической остойчивости между кривыми восстанавливающих и кренящих плеч до угла крена, соответствующего максимальной разности между ординатами двух кривых  $\theta_{max} = 40^\circ$  при всех условиях загрузки, должна быть не менее  $0,075 \text{ м} \cdot \text{рад}$ ;
- начальная метацентрическая высота должна быть не менее  $0,30 \text{ м}$ ;
- при расчёте остойчивости судна и определении условного кренящего момента угол  $\alpha$  условного смещения зерна в заполненном отсеке принимается равным  $15^\circ$  и в частично заполненном отсеке -  $25^\circ$ .

Оценка экологической безопасности транспортировки зерна включает три компоненты аддитивной функции полезности (по углу, остаточной площади диаграммы, метацентрической высоте) каждая из которых представляется функцией Харрингтона с отрицательным и положительным градиентами:

$$E_3 = \frac{1}{4}(E_{3\theta} + E_{3S} + E_{3h}), \quad (8)$$

$$E_{3\theta} = \exp(-\exp(-k(\theta_{max} - \theta_i))), \quad (9)$$

где  $k = \frac{6}{\theta_{max} - \theta_{min}}$ ,  $\theta_{max}$  – критическое значение крена при смещении груза на волнении, равное  $12^\circ$ , которое может привести к опрокидыванию судна в штормовых условиях;  $\theta_{min}$  - минимальное значение статического крена при загрузке судна,  $\theta_i$  - текущее значение статического крена судна, вызванного смещением груза на волнении.

$$E_{3S} = \exp(-\exp(-S_i)), \quad (10)$$

где  $S_i$  - текущее значение остаточной площади диаграммы статической остойчивости между кривыми восстанавливающего и кренящего моментов при всех условиях загрузки, но не менее  $0,075 \text{ м} \cdot \text{рад}$ , что соответствует по оси ординат шкалы желательности Харрингтона значению  $0,37$ ;

$$E_{3h} = \exp(-\exp(-k(h_{KP} - h_i))) \quad (11)$$

где  $k = \frac{6}{h_{KP} - h_{min}}$ ,  $h_{min}$  - значение метацентрической высоты на волнении, определяемое по формуле (2);  $h_{KP}$  - критическое значение метацентрической высоты судна на волнении, определяемое по формуле (3).

### Перевозка генеральных грузов

Генеральный груз – это штучный вид разнообразной по характеристикам, обычно дорогостоящей продукции, для транспортировки которой требуется индивидуальная упаковка, тара, или укрепленные грузовые места. В отличие от других видов грузов, для его перевозки требуется тщательная подготовка – надежное крепление грузовых мест. Перевозка генеральных грузов осуществляется большими партиями на одном транспортном средстве.

В процессе перевозки генеральных грузов необходимо учитывать следующие, критические, с точки зрения влияния на экологическую безопасность транспортировки, свойства: вероятность смещения груза под воздействием качки и вибрации; возможность самозогревания, самовозгорания и выделения опасных паров и газов; потеря качества под воздействием влаги, пыли, загрязнений, тепла, коррозии, испарений, негативного влияния микроорганизмов и бактерий; необходимость обеспечения определённых температурных и влажностных режимов перевозки.

Например, при транспортировке хлопка, являющегося огнеопасным грузом, необходимо учитывать возможность его самовозгорания. Хлопок транспортируется спрессованным в кипы, обшитые тканью и стянутые поверх обшивки металлической лентой. Этот груз является плохим проводником тепла. При попадании на него масла или жира происходит интенсивный местный нагрев волокон, который может привести к самовозгоранию.

Поэтому оценка экологической безопасности перевозки хлопка может быть выполнена с привлечением функции полезности релейного вида: неудовлетворительно –  $E_{ГХ} = 0$ , когда груз не удовлетворяет требованиям перевозки и  $E_{ГХ} = 1$  - удовлетворительно, когда груз удовлетворяет этим требованиям.

### Перевозка опасных грузов

Перевозка опасных грузов на судах, морем и внутренним водным транспортом – один из самых востребованных способов доставки опасных грузов. Транспортировка веществ повышенного риска требует от участников процесса ответственного подхода, серьезной подготовки, знания правил, регламентов и документов.

До начала погрузки опасных грузов судовая администрация обязана проверить готовность судна к перевозке. В перечень подготовительных мероприятий входит:

- зачистка, мойка и сушка грузовых помещений, особенно, если предполагается перевозка взрывчатых и огнеопасных грузов после выгрузки пылеобразующих грузов;
- проверка технического состояния оборудования судна – средств пожаротушения,

системы пожарной сигнализации, газоанализаторов, системы освещения, осушительной системы и системы вентиляции;

- инструктаж членов экипажа о свойствах груза, характере его опасности, видах упаковки грузов, назначении знаков опасности, правилах укладки, методах предосторожности и первой помощи пострадавшим, правилах техники безопасности;

- инструктаж аварийных партий по отработке методов тушения пожаров и ликвидации аварийных разливов и рассыпания груза.

Эффективность экологической безопасности перевозки опасного груза оценивается с помощью реализации следующих факторов: соблюдение правил хранения опасных грузов ( $E_{o1}$ ); соблюдение правил их перевозки ( $E_{o2}$ ); учёт особенностей физико-химических свойств груза ( $E_{o3}$ ) и условий размещения груза на судне ( $E_{o4}$ ).

Оценка эффективности реализации данных процедур может быть выполнена с помощью функции Харрингтона табличного вида:

Таблица 2

Полезность	Отметки на шкале полезности
Очень хорошо	1,00 - 0,81
Хорошо	0,8 - 0,64
Удовлетворительно	0,63 - 0,38
Плохо	0,37 - 0,21
Очень плохо	0,20 - 0,00

Выбор значений 0,63 и 0,37 по шкале полезности объясняется удобством вычислений:  $0,63 \cong 1 - (1/e)$ ,  $0,37 \cong 1/e$ . Значение  $P(x) = 0,37$  обычно соответствует границе допустимых значений. Табличные значения соответствуют точкам кривой, которая задается уравнением для функции полезности вида:

$$P(x) = \exp(-\exp(-x)), \quad (12)$$

При равенстве коэффициентов важности реализации вышеназванных процедур, сопровождающих транспортировку опасного груза, оценка экологической безопасности перевозки проводится с привлечением мультипликативной функции следующего вида:

$$E_0 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 E_{oj}, \quad (13)$$

где  $E_{oj}$  - эффективность выполнения  $j$ -го мероприятия, обеспечивающего перевозку опасного груза.

### Перевозка леса

Судовые перевозки леса — перевозки лесоматериалов по водным путям в судах, на самоходных и несамоходных баржах. К основным достоинствам водного транспорта леса следует отнести сравнительно малые эксплуатационные и капитальные затраты.

Транспортировка леса в штормовых условиях опасна вследствие возможной утраты остойчивости судна с последующим опрокидыванием и загрязнением акватории. Расчёт остойчивости судна выполняется при составлении грузового плана. Определение метацентрической высоты судна как в

момент окончания погрузки леса на палубу, так и при плавании, может быть выполнен по периоду собственных колебаний судна [7].

Для транспортировки леса (кругляка) и пиломатериалов, как правило используются однопалубные лесовозы. Лесовозы с палубными грузами должны иметь остойчивость, при которой качка не будет вызывать возникновения в элементах крепления груза напряжений, превосходящих допустимые.

Решить эту задачу можно по формуле:

$$P_Y = \frac{m \cdot 4 \cdot \pi^2}{g \cdot T_\theta^2} \cdot \left( \theta \cdot z + \frac{\eta_B}{2} \cdot \sin \theta \right) + m \cdot \sin \theta + F, \quad (14)$$

где:  $P_Y$  – сила, смещающая груз в поперечном направлении, тс;  $m$  - масса груза, т;  $T_\theta$  - период качки судна по крену, с;  $\theta$  - угол крена, градусы;  $z$  - расстояние по вертикали между центром тяжести судна и центром тяжести груза, м;  $\eta_B$  - высота волны, м.

Период качки судна связан с метацентрической высотой. Для определения метацентрической высоты, при которой сила, смещающая груз в поперечном направлении, не будет превышать расчётную допустимую, воспользуемся формулой:

$$h_{Ki} = \left( 0,78 \cdot \frac{B}{T_\theta} \right)^2, \quad (15)$$

где  $B$  - ширина судна, м.

Так же можно определить метацентрическую высоту по периоду качки и высоте борта судна:

$$h_{Ki} = \frac{4}{T_\theta^2} \cdot \left( \frac{B^2 \cdot C_B}{10,3 \alpha^2} + \frac{H^2}{11} \right), \quad (16)$$

где:  $C_B$  – коэффициент полноты водоизмещения,  $\alpha$  - коэффициент полноты ватерлинии,  $H$  – высота борта, м.

Приведённая информация вводится в информационно-измерительную систему, которая, в зависимости от бортовой качки судна, будет непрерывно генерировать данные по текущей метацентрической высоте [8].

Известно, что скобы, устройства для обтягивания найтовых и другие детали, включённые в найтов, должны выдерживать предельную нагрузку 14380 кгс. Подставив эту величину в левую часть формулы (14) вместо  $P_Y$ , можно определить значение периода качки, вызывающей критическое напряжение найтовых.

$$T_\theta^2 = \frac{m \cdot 4 \cdot \pi^2}{g \cdot 14380} \cdot \left( \theta \cdot z + \frac{\eta_B}{2} \cdot \sin \theta \right) + m \cdot \sin \theta + F, \quad (17)$$

Подставив величину периода качки в формулу (16) получим критическое значение метацентрической высоты в штормовых условиях -  $h_{Kкр}$ .

Зная метацентрическую высоту загруженного судна в порту -  $h_{гп}$ , а также значение метацентрической высоты судна при качке, которая является критической для крепления палубного груза, можно оценить экологическую безопасность перевозки леса, используя функцию Харрингтона с отрицательным градиентом:

$$E_L = \exp \left( -\exp \left( -k(h_{гп} - h_i) \right) \right), \quad (18)$$

где  $k = \frac{6}{h_{ГН} - h_{Ксп}}$ ;  $h_i$  - текущее значение метацентрической высоты.

### Перевозка наливных грузов

Наливные грузы — это вещества, которые для сохранения своих свойств и товарных качеств должны перевозиться в жидком или сжиженном состоянии: растительные масла, спирты, нефть и нефтепродукты, кислоты, пропан, бутан и пр. Перевозка наливных грузов осуществляется с применением специального флота - танкеров, химвозов или газозовов.

Танкер, который является наиболее распространенным видом специальных транспортных средств, используется для транспортировки нефтепродуктов и прочих наливных грузов. Танкер - однопалубное судно, грузоподъемностью до 400 тыс. т. Верхняя палуба такого судна оснащена трубами, через которые производится подача и слив груза. Грузовая часть таких судов делится поперечными и продольными переборками на грузовые танки (отсеки), которые заполняются наливным грузом. Танкер имеет насосное отделение, с помощью которого происходит разгрузка судна. Подобные суда оснащены двойным дном и двойными бортами - для предотвращения попадания груза в окружающую среду. Некоторые суда такого типа могут одновременно перевезти до пяти видов наливных грузов. Разгрузка танкеров происходит возле выступающих причалов, от которых к берегу протянуты нефтепроводы. Потенциальная экологическая опасность подобных судов связана как с возникновением пожара, так и с нарушением герметичности корпуса.

Газозовы перевозят газы (пропан, метан, аммиак) в сжиженном состоянии. Морские газозовы оснащены вкладными цистернами цилиндрической, прямоугольной или сферической формы и оборудованы насосами, системой трубопроводов, компрессорами - для выполнения разгрузочных операций. Например, газозовы, для транспортировки метана при температуре до -160 С, оборудованы цистермами прямоугольной формы.

Транспортировка наливных грузов имеет свои особенности, обуславливающие необходимость соблюдения специфических требований при их перевозке, хранении, погрузке и выгрузке.

С точки зрения безопасности при транспортировке нефтепродуктов важным свойством является температура вспышки, при которой нагреваемый в стандартных условиях нефтепродукт выделяет такое количество паров, которые образуют с окружающим воздухом горючую смесь, вспыхивающую при поднесении к ней пламени. Для разных нефтепродуктов температура вспышки разная. Выделяют нижний и верхний пределы взрываемости горючих веществ. Нижний предел - предельная концентрация паров вещества в воздухе, необходимая для их воспламенения. Верхний предел взрываемости обозначает предел концентрации газо-воздушной смеси, выше которой смесь не может воспламениться. Оценка безопасности транспортировки нефтепродуктов опирается на информацию о содержании паров в воздухе и его температуре. Если температура паров

находится в границах пределов взрываемости, то при любом давлении паров происходит взрыв. Следовательно оценить безопасность транспортировки нефтепродуктов можно в виде функций полезности релейного вида: неудовлетворительно -  $E_{ГН} = 0$ , если температура паров нефтепродуктов находится ниже верхнего предела взрываемости и  $-E_{ГН} = 1$ , если температура паров нефтепродуктов находится выше верхнего предела взрываемости.

Спирты обладают многими свойствами, присущими нефтепродуктам. Они огнеопасны, взрывоопасны, способны к накоплению статического электричества. Наличие значительной доли лёгких фракций в спиртах предопределяет их интенсивную испаряемость. Все спирты характеризуются наркотическими и токсичными свойствами. Предельно допустимая концентрация паров этилового спирта при работе людей без защитных средств - 1 мг/л, метилового - 0,5 мг/л, бутилового - 0,2 мг/л. Таким образом, безопасность транспортировки спиртов, связанная с контролем концентрации паров, опасной для персонала судна, может быть оценена с помощью функции Харрингтона с отрицательным градиентом:

$$E_{л} = \exp(-\exp(-k(\rho_{Гсmax} - \rho_i))), \quad (19)$$

где:  $k = \frac{6}{\rho_{Гсmax} - \rho_{Гсmin}}$ ;  $\rho_{Гсmax}$  - опасная концентрация паров спирта для экипажа;  $\rho_{Гсmin}$  - минимальная концентрация паров спирта, соответствующая 0 на оси абсцисс функции Харрингтона;  $\rho_i$  - текущее значение концентрации паров спирта, определяющее экологическую безопасность транспортировки.

Химические грузы агрессивно воздействуют на корпус и оборудование судна, токсичны и представляют опасность для окружающей среды. На танкере - химвозе устанавливаются приборы для контроля загазованности, индикаторы горючего газа, химического абсорбирования и концентрации кислорода. Экологическую безопасность транспортировки химических грузов можно оценить совокупностью трёх компонентов:  $E_{ГХГ}$  - опасность присутствия горючих газов,  $E_{ГХА}$  - учёт химического абсорбирования,  $E_{ГХК}$  - оценка концентрации кислорода в различных отсеках судна. Каждый из компонентов можно учесть функцией Харрингтона с отрицательным градиентом:

$$E_{ГХi} = \exp(-\exp(-k(X_{ГХimax} - X_{ГХi}))), \quad (20)$$

где:  $k = \frac{6}{X_{ГХimax} - X_{ГХimin}}$ ;  $E_{ГХi}$  - степень опасности, вызванная наличием горючих газов, химического абсорбирования и присутствием кислорода;  $X_{ГХimax}$  - максимальная концентрация горючих газов, химического абсорбирования и содержания кислорода;  $X_{ГХi}$  - текущие значения концентрации горючих газов, химического абсорбирования и содержания кислорода;  $X_{ГХimin}$  - минимальная величина концентрации горючих газов, химического абсорбирования и содержания кислорода по окончании погрузки и при соблюдении всех правил транспортировки.

Общая экологическая безопасность транспортировки химических грузов может быть оценена мультипликативной функцией вида

$$E_{ГХ} = \prod E_{ГХГ} \cdot E_{ГХА} \cdot E_{ГХК}. \quad (21)$$

Если хотя бы одна из составляющих формулы (21) равна нулю - общая экологическая безопасность обнуляется.

Сжиженные газы по виду и условиям перехода в жидкое состояние, необходимое для морской транспортировки, делятся на: природный газ – метан; газы нефтяной перегонки – пропан, бутан и их смеси; химические газы – этилен, хлорвинил, бутадиен, аммиак.

Применяют три способа сжижения газа для транспортировки морем: под давлением, под давлением с частичным охлаждением, при атмосферном давлении с охлаждением до жидкого состояния.

Низкая точка кипения сжиженных газов и воспламеняемость паров делают их пожароопасными, а низкая температура при транспортировке (-162°C) и увеличение объема при переходе из жидкого состояния в газообразное в отношении 600:1 обуславливают особенности конструкции танкеров – метановозов. Метан менее воспламеняем, чем бензин и нефтяные газы, такие, как пропан и бутан, а по сравнению с аммиаком - менее токсичен. Метан становится опасным при смешивании его паров с воздухом, поэтому конструкцией танкеров – метановозов предусмотрено исключение контакта газа с воздухом при погрузке, перевозке и выгрузке. Пожар возможен только в случае разлива или утечки груза из танков или трубопроводов. Поэтому оценку экологической безопасности транспортировки сжиженных газов можно выполнить с помощью функции полезности релейного вида: неудовлетворительно –  $E_{ГТ} = 0$ , если зафиксирован разлив или утечки из танков или трубопровода и  $E_{ГТ} = 1$  если разлива или утечки нет.

### Заключение

1. Существенное влияние на экологическую обстановку могут оказать аварии и инциденты при транспортировке водным транспортом навалочных грузов. Предложен аналитический инструментарий

оценки экологической безопасности транспортировки подобных грузов.

2. Для грузов, опасных возможностью разложения, а также несмещаемых грузов экологическая безопасность транспортировки определяется аддитивной функцией полезности, состоящей из двух составляющих, имеющих одинаковый коэффициент важности, а для грузов с опасностью смещения экологическая безопасность груза оценивается функцией полезности из трёх составляющих с одинаковым коэффициентом важности.

3. Экологическая безопасность перевозки зерна обуславливается тремя составляющими аддитивной функции полезности, каждая из которых представляется функцией Харрингтона с отрицательным и положительным градиентами.

4. Экологическую безопасность перевозки хлопка можно определить функцией полезности релейного вида.

5. Безопасность подготовительных процедур для перевозки опасного груза, может быть выполнена с помощью функции Харрингтона табличного вида.

6. Зная метацентрическую высоту нагруженного судна в порту и зная значение метацентрической высоты при качке судна, которая является критической для крепления палубного груза, можно оценить экологическую безопасность транспортировки леса используя функцию Харрингтона с отрицательным градиентом.

7. Для оценки безопасности перевозки нефтепродуктов можно использовать функцию полезности релейного вида.

8. Экологическая безопасность перевозки спиртов связана с их концентрацией, опасной для персонала судна, и определяется функцией Харрингтона с отрицательным градиентом.

9. Совокупная экологическая безопасность транспортировки химических грузов оценивается мультипликативной функцией.

10. Опасность возгорания сжиженных газов возникает только в случае разлива или утечки груза из танков или трубопровода. Поэтому оценку безопасности их транспортировки можно выполнить с помощью функции полезности релейного вида.

### Литература

1. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Показатели экологической безопасности водного транспорта // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1 (53). С. 161-170.
2. Кацман Ф.М., Дорогостайский Д.В., Коннов А.В., Коваленко В.П. Теория и устройство судов: учебн. – Л.: Судостроение, 1991. – 416 с.
3. Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Стариченков А.Л. Управление движением водоизмещающих судов на переходе морем // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-1 (45). С. 20-28.
4. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Аксёнов В.А. Оценка экологической эффективности судоходной компании // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (53). С. 86-91.
5. Справочник капитана дальнего плавания / Л. Р. Аксютин и др. Под ред. Г.Г.Ермолаева. - М.: Транспорт, 1988. – 246 с.
6. Каминский В.Ю., Долгова М.А. Перспективные виды транспорта для труднодоступных регионов Российской Федерации // в сборнике: «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2016» материалы Международной научно-практической конференции. 2016. С. 66-78.
7. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Исследование алгоритмической структуры системы управления движением судна на подводных крыльях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 153-163.
8. Вагущенко Л.Л. Интегрированные системы ходового мостика. - Одесса: Латстар, 2003. – 169 с.

### References

1. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Pokazateli ekologicheskoy bezopasnosti vodnogo transporta [Indicators of environmental safety of water transport] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 3-1 (53). pp. 161-170.
2. Kacman F.M., Dorogostajskij D.V., Konnov A.V., Kovalenko V.P. Teoriya i ustrojstvo sudov [Theory and design of ships]: Uchebn. L. Sudostroenie. 1991. 416 p.
3. Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Starichenkov A.L. Upravlenie dvizheniem vodoizmeshchayushchih sudov na perekhode morem [Traffic control of displacement vessels at sea crossing] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 3-1 (45). pp. 20-28.
4. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Marinov M.L., Aksyonov V.A. Ocenka ekologicheskoy effektivnosti sudohodnoj kompanii [Assessment of the environmental efficiency of a shipping company] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 2-1 (52). pp. 86-91.
5. Spravochnik kapitana dal'nego plavaniya [Handbook of a long-distance sailing captain] / L. R. Aksyutin i dr. Pod red. G.G.Ermolaeva. M. Transport. 1988. 246 p.
6. Kaminsky V.Yu., Dolgova M.A. Perspektivnye vidy transporta dlya trudnodostupnyh regionov Rossijskoj Federacii [Promising modes of transport for hard-to-reach regions of the Russian Federation] // V sbornike: «Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2016» materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2016. pp. 66-78.
7. Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Issledovanie algoritmicheskoy struktury sistemy upravleniya dvizheniem sudna na podvodnyh kryl'yah [Investigation of the algorithmic structure of the hydrofoil motion control system] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). pp. 153-163.
8. Vagushchenko L.L. Integrirovannye sistemy hodovogo mostika [Integrated navigation bridge systems]. Odessa. Latstar. 2003. 169 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Валерий Юрьевич Каминский**, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Елена Юрьевна Кузнецова**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: helhena@mail.ru

**Valery Yu. Kaminsky**, senior lecturer, Ph.D (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**Dmitriy A. Skorokhodov**, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

**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/the article was submitted 06.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.08.2022.

Научная статья

УДК 519.876.2, 004.89

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.029>

## Разработка основных принципов моделирования процессов формирования и обслуживания встречных транспортных потоков когнитивной транспортной системы внутренних водных путей

О.Ю. Лукомская<sup>1,2</sup> luol@mail.ru, Ю. А.Лукомский<sup>2</sup> loucomsqui@mail.ru, Н.В.Шаталова<sup>1</sup> shatillen@mail.ru

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук,

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация:** В рамках создания сложной когнитивной транспортно-логистической системы внутренних водных путей России рассмотрены вопросы моделирования процессов формирования обслуживания встречных транспортных потоков в когнитивной транспортной системе. Актуальность исследования подтверждается стратегией развития и цифровой трансформацией транспорта страны. Применение аппарата системной инженерии для построения интеллектуальных транспортных систем позволяет на всем жизненном цикле выделить проблемный кластер, требующий новых принципов разработки в условиях создания цифровых двойников в виртуальном пространстве «Цифровая верфь». Для оценки эффективности модели управления движением беспилотных подвижных объектов внутренних водных путей предложено рассмотреть принципы «нейроуправления» шлюзовой системы. Для этого было проведено построение искусственной нейронной сети и ее исследование методом моделирования темпоральности процесса диспетчеризации транспортных потоков на примере трассы Волго-Донского судоходного канала. Обсуждается возможность применения таких индексных методов поиска кратчайшего пути, как алгоритмы Дейкстры, Флойда и Форда-Беллмана, для оптимизации временного, экологического и энергетического критериев работы шлюзовой системы судопропуска. Для получения наиболее точных оценок проведенного моделирования требуется дальнейшее исследование процессов, протекающих в когнитивной транспортной системе, т.е. необходимо детализировать разрабатываемые сценарии функционирования в модели управления процессов.

**Ключевые слова:** Внутренние водные пути, транспорт, когнитивная система, судопропуск, беспилотные транспортные объекты, транспортный поток, нейроуправление, системная инженерия, целевая функция, алгоритмы поиска кратчайшего пути.

**Для цитирования:** Лукомская О.Ю., Лукомский Ю.А., Шаталова Н.В. Разработка основных принципов моделирования процессов формирования и обслуживания встречных транспортных потоков когнитивной транспортной системы внутренних водных путей, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 220—227.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.029>

## Development of the basic principles of modeling the processes of formation and maintenance of oncoming traffic flows in the cognitive transportation system of inland waterways

Olga Y. Lukomskaya<sup>1,2</sup> luol@mail.ru, Yuri A. Lukomskij<sup>2</sup> loucomsqui@mail.ru,

Natalya V. Shatalova<sup>1</sup> shatillen@mail.ru

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, Russian Federation,

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

**Abstract** The issues of modeling the processes of forming the service of oncoming traffic flows in a cognitive transportation system for creating a complex cognitive transportation and logistics system of inland waterways of Russia are considered. The relevance of the study is confirmed by the development strategy and digital transformation of the country's transportation. The use of the system engineering apparatus for building intelligent transportation systems makes it possible to identify a problematic cluster throughout the entire life cycle that requires new development principles in the context of creating digital twins in the Digital Shipyard virtual space. To evaluate the effectiveness of the model for controlling the movement of unmanned mobile objects of inland waterways, it is proposed to consider the principles of "neural control" of the gateway system. For this, an artificial neural network was built and its study was carried out by modeling the temporality of the traffic flow dispatching process using the example of the Volga-Don shipping canal route. The possibility of using index methods for finding the shortest path, the algorithms of Dijkstra, Floyd and Ford-Bellman, for optimizing the time, environmental and energy criteria for the operation of a navigation lock system is discussed. To obtain the most accurate assessments of the simulation performed, further research is required on the processes occurring in the cognitive transportation system, more accurate development of scenarios for the functioning in the control model of the processes of formation and maintenance of traffic flows is necessary.

**Key words:** Inland waterway, transportation, cognitive system, gateway system, unmanned vehicles, traffic flow, neurocontrol, system engineering, objective function, shortest path algorithms.

**For citation:** Olga Y. Lukomskaya, Yuri A. Lukomskij, Natalya V. Shatalova. Development of the basic principles of modeling the processes of formation and maintenance of oncoming traffic flows in the cognitive transportation system of inland waterways, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 220—227.

### Введение

Когнитивная транспортная система сегодня (КТС) – это система, сформированная в эпоху индустриальной революции Industry 4.0 и охватывающая цифровое пространство потоков больших данных (Big Data), обработка которых требует определенной области знаний и аппаратов продуцирования новых законов функционирования и управления в сложных транспортных системах [1, 2].

КТС наделяет интеллектуальные транспортные системы (ИТС) когнитивными возможностями, такими как: рассуждать, принимать решения, учиться и адаптироваться, а также взаимодействовать с людьми, транспортными средствами и инфраструктурой, в которой они работают [2]. Эффективное использование информационных и коммуникационных технологий, а также алгоритмов искусственного интеллекта, ориентированных на понимание физического и социального мира, в котором они взаимодействуют, позволит оптимизировать работу транспортных систем, снижения затрат, повышения эффективности, и обеспечение более высокого качества жизни общества в целом [1, 2].

Механизмы расширения виртуального пространства в части создания цифровых двойников в проекте «Цифровая верфь», инициируют возможность и потребность в «Цифровой системе судопропуска» (ЦСС), в том числе и навигационно-управляющую систему прокладки пути для судов «Е-лоцман» [3].

Актуальность исследований несомненна, вопрос перехода к интеллектуальным транспортным системам, в том числе и когнитивным, определяет мировое господство технического прогресса страны.

Кроме того, существуют отрицательные моменты в развитии транспортной отрасли РФ, из которых наиболее важными для развития внутреннего водного транспорта являются, согласно [4]:

- высокая аварийность ввиду человеческого фактора;
- неэффективность перевозочного процесса традиционными видами транспорта;
- отсутствие возможности оперативного управления транспортным комплексом из единого центра в зависимости от ситуации;
- низкое информобеспечение транспортной безопасности, кибербезопасности;
- отсутствие возможности мониторинга состояния объектов транспортной инфраструктуры на всех этапах жизненного цикла.

Актуальность исследования подчеркивается отсутствием стратегии развития инновационных видов транспорта, в том числе автономных морских и речных судов, и разработки организационной модели, включающей в себя подготовку операторов цифровой инфраструктуры, центры управления трафиком, в том числе не существует единой системы моделирования транспортных потоков с применением технологий искусственного интеллекта и больших данных; единой защищенной цифровой среды оперативного взаимодействия, кроме того

существует потребность в предиктивной аналитике технического и организационного порядка состояния КТС для необходимости проведения обслуживания и ремонта [4].

Проведенные исследования в части движения транспортного потока мобильных объектов (по параметрам интенсивности и плотности потока) на примере модели «интеллектуальная жидкость» [5] доказали, что моделирование транспортных потоков может опираться на концепцию движения людских потоков, представленную системой нелинейных дифференциальных уравнений (СНДУ). При этом модель учитывает варианты движения групп людей разной степени мобильности, в том числе и лиц с ОВЗ.

Опираясь на известные принципы «нейроуправления» [2, 6] группой подвижных объектов речного транспорта для шлюзового системы судопропуска, наиболее приемлемым может быть вариант включения нейроконтроллера с эталонной моделью. Однако, вопросы построения искусственной нейронной сети и ее исследования методом моделирования темпоральности процесса диспетчеризации транспортных потоков на трассах Волго-Донского судоходного канала, требует проверки разных и многих вариантов сценария.

### Постановка задачи исследования и анализ предметной области

Волго-Балтийский (ВБСК) и Волго-Донской судоходные каналы (ВДСК) являются основными водными коммуникациями страны, обеспечивающими реализацию транспортно-логистических задач экономически наиболее целесообразным путем. Кроме этого, в целях обеспечения транспортной связности регионов страны с Арктической зоной, актуализируется задача интеграции внутренних водных путей в Северный морской путь, – Арктический бассейн – проекты «Водный путь БалтСиб», Волго-Печорский путь [7]. По данным Росстата объем перевозок грузов в акватории Северного морского пути РФ только за первое полугодие 2022года превысил средний годовой показатель за последние 3 года на 70% (2019г–31,531 млн.т, 2020 – 32,98млн.т, 2021 – 34,87 млн.т, 2022 – 57млн.т) [8].

Поэтому, применение интеллектуальных технологий в транспортно-логистической системе внутренних водных путей актуально и должно быть проведено корректно, экономически обосновано и в соответствии с системным подходом проектирования интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [9].

Построение такой ИТС, как когнитивная ЦСС, осуществляющая управление проходом судов по шлюзовым системам судопропуска, может реализовываться с использованием интеллектуального управления или использующим различные реализации искусственного интеллекта: алгоритмов машинного обучения, эволюционных вычислений, генетических алгоритмов, принципов самоорганизации, нечеткого управления (“fuzzy-logic”), нейро-нечеткого управления (“neuro-fuzzy-logic”) и принципов нейроуправления, реализуемых

на нейрокompьютерах и нейромодулях (нейрочипах и нейроконтроллерах) [1, 2, 6, 10].

Применимость вариантов темпорального регулирования шлюзования в системах судопропуска просматривается в работах по Автономному управлению перекрестком (AIM), как альтернатива светофорному управлению движением на перекрестке. Суть их в наличии диспетчерских перекрёстков (IM) с централизованным управлением автономными транспортными средствами, на которые поступают заявки от пересекающими перекресток БПО на резервирование “пространства-время” зоны пересечения автомобильных потоков [11–13]. В более поздних работах были добавлены протоколы по смешанному потоку транспортных средств, используя зависимости от потребностей и состояния каждого пересечения с директивной информацией от IM в сообщении об отказе в запросе на пересечение рекомендуемую скорость замедления для сокращения времени ожидания. Предложенный алгоритм показал сокращение времени ожидания более чем на 85%, а также снижение расхода топлива более чем на 50% [12, 13].

Варианты использовать аукционы для получения права проезда транспортных средств Carlino et al. в [12] показали заметные улучшения в показателях транспортного потока. Однако основная проблема заключается в подходе, применяемом с использованием ставок, т.к. некоторые автомобили останутся без возможности пересечь зону проезда (неопределенное время ожидания, в дополнение к созданию рыночной экономики используемой валюты, инфляции, дискриминация и т.д.). Хотя предложенные AIM обладали свойствами сокращать задержку транспортного потока (ТП) более чем на 60%, работа Levin et al [13] показала, что при определенных условиях эти новые AIM могут обеспечивать неадекватное поведение, которое может привести к неадекватным результатам.

### Системный подход при проектировании интеллектуальных транспортных систем

Разработка ИТС в соответствии с системным подходом в США выполняется по модели «V» [14], которая позволяет расширить возможности ИТС. Концепция модели «V» – это «следовать процессу системного проектирования, определяя потребности, требования и проектирование высокого уровня без указания технологии до момента внедрения», что важно для развития отрасли IT-технологий.

Системная инженерия является междисциплинарным подходом и средством, позволяющим реализовать успешные, с точки зрения получаемого экономического, временного и социального эффектов, системы. Основное внимание уделяется определению потребностей конечного пользователя и требуемой функциональности в начале цикла разработки, документированию требований, а затем при разработке проекта, проверке системы, при рассмотрении полной проблемы в ИТС [9].

Рассмотрим этапирование жизненного цикла ИТС – функция  $F(t)$  (рис.1). Выделим шесть основных стадий, для реализации которых можно использовать модель системной инженерии “V” [14].

Процессы развития ИТС, в соответствии с его жизненным циклом и этапами, можно разделить на задачи (№1-14):

- I. Анализ
  - 1) Анализ региональной архитектуры
  - 2) Техничко-экономическое обоснование/ Концепт исследования
- II. Декомпозиция
  - 3) Концепция операций (Выявление потребностей в ключевых операциях)
  - 4) Определение системных требований
- III. Проектирование системы
  - 5) Проектирование высокого уровня – Физический, технический, информационный, функциональный)
  - 6) Проектирование детальное – Архитектура, разработка аппаратной части и ПО всех компонентов системы
  - 7) Область инсталляции: – Разработка программного обеспечения и оборудования, тестирование, трассировка.
- IV. Отслеживаемость
  - 8) Тестирование компонентов и устройств
  - 9) Проверка подсистем
  - 10) Интеграция и проверка системы.
- Развертывание системы
  - 11) Валидация (тестирование) системы
- V. Функционирование системы
  - 12) Эксплуатация и Техническое Обслуживание
  - 13) Изменение/ Обновление системы
- V. Утилизация системы
  - 14) ЗАМЕНА / Списание



Рис. 1. Этапы жизненного цикла ИТС

Процессы в модели и связанные с ними шаги, которые обеспечивают наглядность в развитии проекта и позволяют выявить проблемы и внести уточнения в процесс разработки:

– *технические процессы*, такие как системные требования, проектирование высокого уровня, интеграция и проверка;

– *процессы управления проектом*: планирование проекта, управление рисками и управление конфигурацией. Эти сквозные действия так же важны для успеха проекта, но они не отображаются в «V». Процессы используются для планирования, мониторинга и контроля проекта ИТС, чтобы он был выполнен за конечное время и в экономическом балансе (стратегический, тактический, ситуационный уровни управления [15]).

На втором этапе ЖЦ ИТС формируется целевая функция управления ТС, которая будет определяться целевой функцией управления состоянием технической структуры ТС и целевой

функцией управления состоянием организационной структуры ТС (табл.1) в соответствии с [16]:

$$Z_{ТС} = \{Z_{КТС}, Z_{ОС}\} = \\ = Z_{КТС} \circ Z_{ОС} = Z^Б \circ Z^{ТрП} \circ Z^{ТПр} \circ Z^{ДТ} \circ Z^{РТС} \circ Z^С$$

Таблица 1

Функции транспортной системы	
Описание	Чем достигается
Обеспечение безопасности транспортного процесса – динамически устойчивое состояние в процессе транспортировки [3] $Z^Б$	1) технической исправностью элементов ТС и неразрывностью их связей $Z^Б_1$ ; 2) квалифицированным управлением на всех уровнях функционирования ТС (организация управления движением, управление транспортными средствами, управление транспортными потоками и пр.) $Z^Б_2$ ; 3) конструктивной целостностью элементов (транспортных средств, транспортных коммуникаций, сохранность грузов) $Z^Б_3$ ; 4) отсутствием угроз для элементов оргструктуры ТС (жизни и здоровья людей) $Z^Б_4$ ; 5) отсутствием негативного влияния на окружающую среду (экологический фактор) $Z^Б_5$ ; 6) экономической целесообразностью $Z^Б_6$ ; 7) отсутствием нештатных ситуаций (минимизация влияния природных катаклизмов, снижение развития «человеческого фактора», противопожарная защита, защита от террористических актов) $Z^Б_7$ .
Обеспечение необходимого объема ТП $Z^{ТрП}$	1) пропускной способностью транспортной коммуникации и транспортных узлов $Z^{ТрП}_1$ ; 2) провозной способностью транспортных средств $Z^{ТрП}_2$ ; 3) скоростью движения транспортного потока $Z^{ТрП}_3$ ; 4) согласованностью транспортного потока $Z^{ТрП}_4$ ; 5) мерой организованности транспортного потока. $Z^{ТрП}_5$
Обеспечение непрерывности процесса транспортировки («от двери до двери», в заданные сроки, регулярно) $Z^{ТПр}$	1) устойчивостью процесса транспортировки (с соблюдением плановых транспортных операций в промежутках доверительного интервала) $Z^{ТПр}_1$ ; 2) организованностью процесса транспортировки; $Z^{ТПр}_2$ ; 3) согласованностью процесса транспортировки $Z^{ТПр}_3$ .

Доступность территор-ом экономичес. аспектах $Z^{ДТ}$	в 1) хорошо развитой транспортной сетью с возможностью ее расширения $Z^{ДТ}_1$ ; 2) функционированием и взаимодействием различных видов транспорта (интер- и мульти-модальные перевозки) $Z^{ДТ}_2$ ; 3) низкими тарифами на транспортировку (перевозку) $Z^{ДТ}_3$ .
Развитие транспортной сети, транспортных элементов, транспортных услуг, в т.ч. инновационное $Z^{РТС}$	1) устойчивостью функционирования ТС $Z^{РТС}_1$ ; 2) пространственным развитием инфраструктуры агломераций. $Z^{РТС}_2$ 3) непосредственное государственное руководством областью народного хозяйства, производящей знания $Z^{РТС}_3$ ; 4) распределением государственных заказов научным центрам $Z^{РТС}_4$ ; 5) представлением грантов на проведение фундаментальных научных исследований ученым и обеспечение возможности публикации результатов исследований $Z^{РТС}_5$ ; 6) созданием благоприятных условий для производства научных знаний и новых технологий в негосударственных учреждениях и предприятиях $Z^{РТС}_6$ .
Цифровое развитие транспортной системы $Z^С$	цифровой трансформацией, созданием цифровых двойников объектов и систем

Множества функционалий расширяемы, модельно описательны и реализуемы технически [3, 16].

**Решение задачи управления проходом судов по шлюзовым системам судоходных каналов с помощью нейросетевых технологий**

Представить иерархию вложенных уровней интеллектуального управления можно так, как показано на рисунке 2 согласно [6].



Рис.2. Уровни интеллектуального управления, согласно [6]

Нейронное управление принято классифицировать по методам и соответствующим им схемным решениям включения нейроконтроллеров [6]: – метод прямого нейроуправления с обратной связью, – метод гибридного параллельного нейроуправления, – метод подражающего нейроуправления, – метод обобщенного инверсного нейроуправления, – метод обратного пропуска ошибки через прямой нейроэмулятор, – нейроуправление с эталонной моделью, – метод нейросетевой фильтрации внешних возмущений, – метод прогнозирующего модельного нейроуправления, – метод адаптивной критики, – метод обратного пропуска ошибки через прямой нейроэмулятор.

Для создания высокоэффективных нейроконтроллеров используют искусственные нейронные сети (ИНС), грамотное проектирование которых предполагает изучение и разработку физических, математических и технологических моделей ИНС [10].

Аппарат ИНС для задач управления движением судов по шлюзовой системе будет интеллектуальной составляющей системы информационной поддержки принятия решений (СППР) диспетчера трассы. Построение ИНС позволит оптимизировать по минимальному критерию временные, экологические (расход воды в камере), механические и трудовые ресурсы объекта моделирования – судоходного канала.

Моделирование начинается с рассмотрения технологического процесса управления проходом судов по шлюзовым системам судопропуска, выделяют уровни [18, 19]:

1) планирования или формирования расписания входов судов в канал и прохода их по шлюзовой системе (по предварительным заявкам), т.е. распределение времен обслуживания на шлюзе без конфликтности ресурса на транспортной траектории движения судна во временной области. На этом этапе обеспечивается бесконфликтное и согласованное движение судов по каналу и вырабатывается принцип регулярности ТП.

2) измерения или фиксация смещений временных величин реального процесса обслуживания судов на шлюзовой трассе от запланированных в узлах обслуживания – шлюзах);

3) регулирования или выработка управляющих решений по минимизации временных смещений, возврат на плановую траекторию движения. Применимы законы регулирования: пропорциональный, интегральный, пропорционально-интегральный, пропорционально-интегрально-дифференциальный.

Кусочно-линейная временная аппроксимация функции движения судна по трассе судопропуска –  $y(t)$  (см. формулы (1), (2) в [18]). В качестве шага дискретизации выбрано среднестатистическое время обслуживания судов в шлюзовой камере, например для ВДСК  $T_{\text{quant}} = T_0 = 30$  мин

Процедура временного квантования  $y(t)$  позволяет выделить «окна» в движении транспортных средств на участках трассы, что является резервным временным «банком» в целях компенсирования задержек в транспортном процессе или для осуществления профилактических и

ремонтных работ.

По представленным данным на сайте «Администрация Волго-Донского бассейна внутренних водных путей» время прохождения пути канала ВДСК, в зависимости от типа судна, составляет от 23 до 32 часов.

Итак, для реализации модели с помощью ИНС следует:

1) сформировать расписание движения судов (подробно в [15, 18, 19]);

2) смоделировать процесс регулирования с учетом возможных временных смещений в опытно-технологическом процессе шлюзования [15, 18].

Пусть имеется  $n$ -заявок от судоводителей, которые необходимо включить в расписание и  $m$ -шлюзов (для ВДСК – 13), в которых проводится обслуживание судов; временная сетка ограничена 30мин; проход судов по одному направлению осуществляется с дискретностью в  $2 \times T_{\text{quant}}$ .

Расписание прохождения канала по узлам обслуживания можно представить в виде множества кусочно-временных отрезков  $dy_i(t)/dt_i$ , входные технико-метрические данные и для ВДСК [18] представлены в таблице 2.

Таблица 2

Входные данные ВДСК

N/ N	Наименование величины	Возможные значения	Промежуток для обучения	Дискретность
1.	Расстояние между шлюзами (S, км)	{1.2, 1.4, 1.5, 1.7, 2.1, 2.8, 5.8, 6.0, 8.0, 12.0, 15.0, 18.0}	[0;18.0]	0.5
2.	Лимит скорости судна участках (V, км/ч)	{2.4, 2.8, 3.0, 3.4, 4.2, 5.6, 5.8, 6.0, 7.5, 8.0, 10.0, 12.0}	{0;2.4}, {0;2.8} 3.0, 3.4, 4.2, 5.6, 5.8, 6.0, 7.5, 8.0, 10.0, 12.0}	0.5
3.	Предельная скорость судна ( $V^{\text{max}}$ , км/ч)	{8.0, 12.0}	[0; 8.0]; (8.0;12.0]	0.5
4.	Номера узлов (n)	{301, 1–9, 9а, 10, 10б, 11–13, М}	[0;16]	1
5.	№ направления движения (1–13, 13–1)	{0; 1}	[0; 1]	1

Исходя из расчетных данных в [17], время движения по ВДСК в одном направлении составляет 21 час, обучение сети будет проводиться по выборке значений, полученных в [18].

Вариант проектирования ИНС трассы ВДСК (см. рисунок): 15 слоев, каждый из которых соответствует выбранному шлюзу (1–13), входу (0), выходу (14) из канала. В слое представлены нейроны, имеющие номера от 0 до 47. Из каждого нейрона  $i$ -го слоя идут связи к каждому нейрону соседнего слоя. На первый

слой подается вектор  $x = [x_0, x_1, \dots, x_{47}]$ , который представляет собой последовательность нулей и единиц. Единица означает, что соответствующие 30 минут связаны с прохождением судна.

В математическом программном обеспечении *Matlab R2022a* функция `net = newgrnn(ideal_schedule, ideal_schedule, 0.001)` позволяет создать нейронную сеть регрессии и провести ее обучение на основе идеального расписания (*planned\_schedule*). Фрагмент программного кода представлен на рис.3.

Используется ИНС с учителем, т.е. для нее заданы сразу значения выходов, требуемые по условию задачи. И, используя детерминированный метод обучения, нейронная сеть сама корректирует параметры скрытого слоя, обеспечивая необходимый результат, полученный путем обработки заданных входных значений [10].

После проведения обучения на основе идеального расписания, процесс регулирования движения, в случае отклонений от расписания возможен, при определении задачи оптимального поиска процедуры регулирования для тестирования ИНС [18, 19]. Критерием качества моделирования ИНС будет нахождение функции ошибки обучения сети [10, 17].

```

% Создание нейронной сети регрессии с одним скрытым слоем.
ideal_schedule=[1;1];
[net,info]=newgrnn(ideal_schedule,ideal_schedule,0.001); % Создание нейронной сети регрессии с одним скрытым слоем.
% Проверка работы нейронной сети.
net_test=[1;1;1;1;1;1]; % Входные данные в виде столбца.
[net_test,info]=feedforward(net,net_test);
% Проверка работы нейронной сети.
net_test=[1;1;1;1;1;1];
% Проверка работы нейронной сети с одним скрытым слоем.
for p=1:length(net_test)
    p_hidden=net.input{2};
    p_hidden=net.input{2};
    p_hidden=net.input{2};
end
% Проверка работы нейронной сети с одним скрытым слоем.
net_test=[1;1;1;1;1;1];
end
% Проверка работы нейронной сети.

```

Рис.3. Фрагмент программного кода

ИНС для описываемой задачи имеет особенности, которые влияют на структуру и организацию обучения сети (например, топология сети может быть такой, как на рисунке 4).

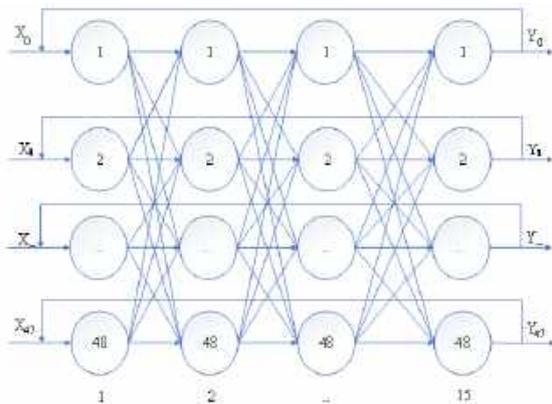


Рис. 4. Пример топологии ИНС ВДСК

Например, в силу того, что движение судов происходит в двух направлениях, а шлюзовые камеры одиночные и работают или на подъем, или на

спуск, то веса связей сети могут быть двойными. Кроме того, количество нейронов в одном слое можно расширить до 1440, т.к. поминутное отслеживание состояния работы шлюза будет обеспечивать более точную настройку сети, соответствующее текущей работе всей ЦСС. Переменное время прибытия судна в шлюз ввиду регламентации предписания графика движения по системе судопропуска с целью упорядоченности ТП и повышению коэффициента упорядоченности. можно рассчитать, воспользовавшись одним из методов поиска кратчайшего пути (например, Дейкстры, Форда-Бэллмана или Флойда) [20], задав переменными весами времени движения на участках. Веса графа движения могут учитывать разный характер скорости движения, в том числе и ресурсосберегающий. Варианты протокола навигационной информации для речных БПО могут быть в форме протокола NMEA-сообщений (разработчик Национальная ассоциация морской электроники). Каждое NMEA-сообщение начинается с символа «\$» и обычно ограничено 82 символами.

**Заключение**

В качестве примеров реализации индексных методов поиска кратчайшего пути по графу приведены адаптированные под программную реализацию методы Форда-Бэллмана, Дейкстры и Флойда с целью доказательства применимости последних в качестве создания нейроподобной структуры среды для осуществления управления движением взаимодействующих потоков БПО [20].

Факторы управляемости процесса обслуживания ТП, согласованности ТП организованности транспортных процессов и фактор резерва пропускной способности систем обслуживания ТП [5, 14] включены в целевую функцию без предварительной детализации.

Используя имитационное моделирование и выполняя мониторинг состояния объекта управления, можно не только обновлять график спектрального распределения событий, но и указывать на нём положение фазовой точки пространства состояний ТС в  $i$ -тый момент времени её работы, но и принимать в соответствии с этим требуемые управленческие решения согласно описанной целевой функции управления ИТС [15, 16].

Моделирование работы интеллектуальной шлюзовой системы судопропуска предполагает проводить тестирование различными сценариям Real-Time, таким как всплеск трафика, асимметричный трафик, интенсивный трафик или трафик, расширенный за счет включения дополнительного потока.

Исследования показали, что процессы формирования и обслуживания встречных транспортных потоков в когнитивной транспортной системе требуют подробного и глубокого изучения, прежде чем они будут работать в реальных системах управления. Изучение новых интеллектуальных элементов КТС требует всестороннего анализа с помощью моделирования, в ходе которого было бы проверено большое количество сценариев для обеспечения надлежащей производительности транспортной системы судопропуска.

### Литература

1. Malygin I., Komashinskiy V., Korolev O. Cognitive technologies for providing road traffic safety in intelligent transport systems. В сборнике: Transportation Research Procedia, 2018. - С. 487-492. EDN: GFXVPT.
2. Veres M. and Moussa M. Deep Learning for Intelligent Transportation Systems: A Survey of Emerging Trends. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 21, no. 8, pp. 3152– 3168, 2020.
3. Лукомский Ю.А., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Обеспечение безопасности водных транспортных средств. –СПб.: «СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 244 с.
4. Паспорт стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации. Опубликовано 16 Июля 2021. <https://mintrans.gov.ru/activities/297/documents/> (дата обращения 25.10.21).
5. Lukomskaya O.Yu., Komashinskiy V.I., Tarantsev A.A., Tarantsev A.A. The description of the transport objects movement via "intellectual liquid" model (in english) // Морские интеллектуальные технологии. –2019. –Т. 2. – № 4 (46). –С. 100–107.
6. Lukomskaya O.Yu., Seliverstov Y.A. On the application of neural network technologies for control problems in cognitive transportation systems //Journal of Physics: Conference Series. 2021.1864 (1).Pp. 012016.
7. Асаул М.А. Волго-Печорский путь/ М.А. Асаул, И.Г. Малыгин, А.Е. Мохов // Транспорт Российской Федерации. – 2020.– № 2 (87). –С. 11–15.
8. Транспорт России // Информационно-статистический бюллетень 2021 год. –Москва. –2022.
9. Лукомская О.Ю. Системный подход при проектировании интеллектуальных транспортных систем // В сборнике: Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. –2019. –С. 37–43.
10. Барский А. Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. Прикладные информационные технологии./ А.Б.Барский.– Москва: Финансы и статистика, 2004.– 176с.
11. Stone P., Dresner K. Human-usable and emergency vehicle-aware control policies for autonomous intersection management. Fourth International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT), Hakodate, Japan, 2016, no. May, pp. 17–25.
12. Carlino D., Boyles S. D., and P. Stone. Auction-based autonomous intersection management. in 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), 2013, no. Itsc, pp. 529–534.
13. Levin M. W., Boyles S. D., and R. Patel. Paradoxes of reservation-based intersection controls in traffic networks. Transp. Res. Part A Policy Pract., vol. 90, pp. 14–25, Aug. 2016.
14. Intelligent Transportation Systems (ITS) Professional Capacity Building (PCB) Strategic Plan, 2017–2021. URL: [https://www.pcb.its.dot.gov/strategic\\_plan/toc.aspx](https://www.pcb.its.dot.gov/strategic_plan/toc.aspx) (дата обращения 28.04.19).
15. Лукомская О.Ю. Модели и алгоритмы оптимальности регулярных транспортных потоков с использованием интеллектуальных систем управления судопропуском // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. –2014. –№ 5. –С. 34–37.
16. Лукомская О.Ю. Формирование целевой функции управления транспортной системы // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2018: материалы Международной научно-практической конференции. ИПТ РАН. Санкт-Петербург. 2018. С. 65–69.
17. Игнатенков, А. В. Применение искусственной нейронной сети для построения расписаний процессов на примере графика движения поездов/ А.В. Игнатенков, А.М. Ольшанский // Современные информационные технологии и ИТ-образование: [сайт] – 2015. – №11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-iskusstvennoy-neyronnoy-seti-dlya-postroeniya-raspisaniy-protsessov-na-primere-grafika-dvizheniya-poezdov> (дата обращения: 20.04.2021).
18. Лукомская, О.Ю. Разработка имитационной модели управления прохождением судов через систему судопропуска Волго-Донского судоходного канала/ О.Ю. Лукомская, С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов, М.А. Асаул. // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 3-3 (37). – С. 105–114.
19. Лукомская, О.Ю. О разработке и тестировании алгоритма планирования расписания движения судов через систему Волго-Балтийского судоходного канала/ О.Ю. Лукомская, С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов, Н.В. Шаталова.– Текст: непосредственный // Морские интеллектуальные технологии. – 2017.– № 4-3 (38).– С. 115–126.
20. Каляев, И.А. Однородные нейроподобные структуры в системах выбора действий интеллектуальных роботов/ И.А. Каляев, А.Р. Гайдук. 2000. С.276.

### References

1. Malygin I., Komashinskiy V., Korolev O. Cognitive technologies for providing road traffic safety in intelligent transport systems. В сборнике: Transportation Research Procedia, 2018. С. 487-492.
2. Veres M. and Moussa M. Deep Learning for Intelligent Transportation Systems: A Survey of Emerging Trends. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 21, no. 8, pp. 3152– 3168, 2020.
3. Lukomskij Yu.A. Scorohodov D.A., Starichenkov A.L. Obespechenie bezopasnosti vodnyh transportnyh sredstv. [Ensuring the safety of water vehicles. Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University, Publ. St.Petersburg, 2012. 244 p.]
4. Passport strategii tsifrovoy transformatsii transportnoy otrasli Rossiyskoy Federatsii. Opublikovano 16 Iyulya 2021. <https://mintrans.gov.ru/activities/297/documents/> (data obrashcheniya 25.10.21).
5. Lukomskaya O.Yu., Komashinskiy V.I., Tarantsev A.A., Tarantsev A.A. The description of the transport objects movement via "intellectual liquid" model (in english) // Marine Intellectual Technologies. –2019. –Т. 2. –№ 4 (46). – С. 100–107.
6. Lukomskaya O.Yu., Seliverstov Y.A. On the application of neural network technologies for control problems in cognitive transportation systems //Journal of Physics: Conference Series. 2021.1864 (1).Pp. 012016.

7. Asaul M.A. Volgo-Pechorskiy put' / M.A. Asaul, I.G. Malygin, A.E. Mokhov // Transport Rossiyskoy Federatsii. – 2020.– № 2 (87). –S. 11–15.
8. Transport Rossii // Informatsionno-statisticheskiy byulleten' 2021. –Moskva. –2022.
9. Lukomskaya O.Yu. Cistemnyy podkhod pri proektirovaniy intellektual'nykh transportnykh sistem // V sbornike: Tekhnologii postroeniya kognitivnykh transportnykh sistem. Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. –2019. –S. 37–43.
10. Stone P., Dresner K. Human-usable and emergency vehicle-aware control policies for autonomous intersection management. Fourth International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT), Hakodate, Japan, 2016, no. May, pp. 17–25.
11. Carlino D., Boyles S. D., and P. Stone. Auction-based autonomous intersection management. in 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), 2013, no. Itsc, pp. 529–534.
12. Levin M. W., Boyles S. D., and R. Patel. Parado es of reservation-based intersection controls in traffic networks. Transp. Res. Part A Policy Pract., vol. 90, pp. 14–25, Aug. 2016.
13. Intelligent Transportation Systems (ITS) Professional Capacity Building (PCB) Strategic Plan, 2017–2021. URL: [https://www.pcb.its.dot.gov/strategic\\_plan/toc.aspx](https://www.pcb.its.dot.gov/strategic_plan/toc.aspx) (data obrashcheniya 28.04.19).
14. Lukomskaya O.Yu. Modeli i algoritmy optimal'nosti regulyarnykh transportnykh potokov s ispol'zovaniem intellektual'nykh sistem upravleniya sudopropuskom // Izvestiya SPbGETU LETI. –2014. –№ 5. –S. 34–37.
15. Barskiy A. B. Neyronnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinyatie resheniy. Prikladnye informatsionnye tekhnologii. / A.B.Barskiy. – Moskva: Finansy i statistika, 2004. – 176s.
16. Lukomskaya O.Yu. Formirovanie tselevoy funktsii upravleniya transportnoy sistemy // Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2018: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. IPT RAN. Sankt-Peterburg. 2018. S. 65–69.
17. Ignatenkov, A. V. Primenenie iskusstvennoy neyronnoy seti dlya postroeniya raspisaniy protsessov na primere grafika dvizheniya poezdov / A.V. Ignatenkov, A.M. Ol'shanskiy // Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie: [sayt] – 2015. – №11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-iskusstvennoy-neyronnoy-seti-dlya-postroeniya-raspisaniy-protsessov-na-primere-grafika-dvizheniya-poezdov> (data obrashcheniya: 20.04.2021).
18. Seliverstov S., Seliverstov Y., Lukomskaya O., Asaul M. Development of the simulation of management of the lock control system Volga-Don channel [Marine intelligent technologies [Morintech]. 2017. T. 3. No3(37). Pp.105-114.
19. Lukomskaya Ol'ga Yu., Seliverstov Svyatoslav A., Seliverstov Yaroslav A., Shatalova Natal'ya V. About development and testing of the schedule planning algorithm on the vessel traffic via the system of the Volgo-Baltic shipping channel. [Marine intelligent technologies [Morintech], 2017. T. 3. No3-4(38). Pp.115-126.
20. Kalyaev, I.A. Odnorodnye neyropodobnye struktury v sistemakh vybora deystviy intellektual'nykh robotov/ I.A. Kalyaev, A.R. Gayduk. 2000. S.276.

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

**Ольга Юрьевна Лукомская**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; доцент кафедры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, e-mail: luol@mail.ru

**Юрий Александрович Лукомский**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, e-mail: loucomsqi@mail.ru

**Наталья Викторовна Шаталова**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, shatillen@mail.ru

**Olga Y. Lukomskaya**, Associate Professor, PhD (Eng), Leading Researcher Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Associate Professor of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: luol@mail.ru

**Yuri A. Lukomskij**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor Emeritus Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: loucomsqi@mail.ru

**Natalya V. Shatalova**, Ph.D. (Eng), Leading Researcher Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences. 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, shatillen@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2022.  
 Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.  
 Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2022.

Научная статья

УДК 519.876.5+621.397.132

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.030>

## Применение нейронной сети для синтеза дополнительных ракурсов в задаче построения виртуального пространства морского бортового тренажера

Д.А. Татаренков<sup>1</sup> dtatarenkov@outlook.com, Г.Г. Рогозинский<sup>1,2</sup> gleb.rogozinsky@gmail.com, И.Г. Малыгин<sup>2,3</sup> malygin\_com@mail.ru, А.А. Кутлыярова<sup>4</sup> mr.echelon17@gmail.com

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М.П. Бонч-Бруевича,

<sup>2</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук,

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, <sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения

**Аннотация.** В данной статье представлена усовершенствованная технология обучения корабельного состава. Одной из особенностей технологии является использование виртуальной реальности для имитации рабочего пространства экипажа и нестандартных ситуаций. Рассматриваемая технология может быть использована для создания тренажеров морских судов с использованием киберфизических систем. Практика морской безопасности в безопасной среде возможна путем сочетания методов рендеринга виртуального рабочего пространства и частичного воспроизведения органов управления кораблем в виде интерактивных интерфейсов между обучаемым и средой виртуальной реальности тренажера. Симуляция непредвиденных обстоятельств — это простой и эффективный метод обучения, когда у члена экипажа есть определенное количество свободного времени. Основная цель данной статьи — представить технологию-прототип, способную синтезировать виртуальные ракурсы в иммерсивной среде на основе реальных изображений и соответствующих карт глубины пространства, что значительно сокращает время на разработку модели корабля для создания его симулятора. Основное внимание в статье уделено методам формирования ракурса в условиях шести степеней свободы устройств виртуальной реальности. Рассмотрен метод заполнения возникающих пустот на ракурсах с применением генеративно-сопоставительной сверточной нейронной сети.

**Ключевые слова:** морской тренажер, обучение, иммерсивность, карта глубины, виртуальная реальность, нейронная сеть.

**Для цитирования:** Татаренков Д.А., Рогозинский Г.Г., Малыгин И.Г., Кутлыярова А.А. Применение нейронной сети для синтеза дополнительных ракурсов в задаче построения виртуального пространства морского бортового тренажера // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 228—234.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.030>

## Application of a neural network for the additional views synthesis in the challenge of constructing a virtual marine onboard simulator

Dmitriy A. Tatarenkov<sup>1</sup> dtatarenkov@outlook.com, Gleb G. Rogozinsky<sup>1,2</sup> gleb.rogozinsky@gmail.com, Igor G. Malygin<sup>2,3</sup> malygin\_com@mail.ru, Alexandra A. Kutlyarova<sup>4</sup> mr.echelon17@gmail.com

<sup>1</sup>The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,

<sup>2</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg,

<sup>3</sup>St. Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, <sup>4</sup>Saint-Petersburg State Institute of Film and Television

**Abstract.** This article presents an improved technology for training ship crews. One of the features of the technology is the use of virtual reality to simulate the workspace of personnel and emergency situations. The technology under consideration can be used to create simulators for sea vessels using cyber-physical systems. The practice of maritime safety in a safe environment is possible by combining the methods of rendering a virtual workspace and partial reproduction of the ship's controls in the form of interactive interfaces between the trainee and the virtual reality environment of the simulator. Contingency simulation is a simple and effective training method when a crew member has a certain amount of free time. The main goal of this article is to present a prototype technology capable of synthesizing virtual views in an immersive environment based on real images and corresponding depth maps, which significantly reduces the time for developing a ship model for creating its simulator. The main attention in the article is paid to the methods of angle formation in the conditions of six degrees of freedom of virtual reality devices. A method for filling gaps and cracks on views using a generative-adversarial convolutional neural network is considered.

**Key words:** marine simulator, training, immersiveness, depth map, virtual reality, neural network.

**For citation:** Dmitriy A. Tatarenkov, Gleb G. Rogozinsky, Igor G. Malygin, Alexandra A. Kutlyarova, Application of a neural network for the additional views synthesis in the challenge of constructing a virtual marine onboard simulator // Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 228—234.

## Введение

В настоящее время с каждым днём появляется всё большее количество реальных ситуаций для применения технологий виртуальной реальности (VR) и видеоконтента со свободным изменением точки обзора (Free Viewpoint Video, FVV). Виртуальная реальность представляет собой интерактивную иммерсивную технологию, основанную на информационных вычислениях. Эта технология предоставляет возможность центрам подготовки и повышения квалификации специалистов производить обучение экипажа в условиях локальных учебных лабораторий, без необходимости посещения реальных объектов. Это особенно важно, когда речь идёт об объектах повышенной опасности, в число которых непременно можно отнести морские суда. Виртуальная реальность используется при обучении экипажа, порядку выполняемых действий, необходимых в критических ситуациях, которые сложно смоделировать в реальной жизни без риска здоровью и жизни обучаемого. Интеграция вычислительных ресурсов в физические сущности, выполненные в виде элементов управления агрегатами, датчиков положения объектов внутри отслеживаемой сцены, позволяет в полной мере реализовать концепцию киберфизических систем. По опубликованным данным группы учёных под руководством M. Rall, анализ действий обучаемого – самая важная часть при работе на реальном симуляторе для успешного процесса обучения, обеспечивающая обратную связь для виртуальной системы при обучении [1].

Непредвиденные инциденты на море создают необходимость в улучшении подходов к безопасности, выходя за рамки традиционного мышления, способов и практики. В настоящее время безопасность является приоритетом для судоходных компаний. Использование тренажеров – эффективный вклад в формирование культуры безопасности в судоходном секторе. Сегодняшний сектор хорошо подходит для проектирования и особенно обучения на основе моделирования [2].

Однако рендеринг высококачественных реалистичных локаций остается сложной задачей. Даже используя современные методы, рендеринг такого контента в режиме реального времени достижим только с графическим процессором с поддержкой трассировки лучей. Такие графические адаптеры имеют достаточно высокую стоимость. Для общедоступных встроенных устройств, в число которых входят и смартфоны, трассировка лучей в настоящее время невозможна из-за ограниченной вычислительной мощности. Кроме того, традиционный рендеринг и трассировка лучей опирается на 3D-сетки (меш), что ограничивает достижимый реализм изображения.



Рис. 1. Пример 3D-модели технического помещения

Качественные реалистичные 3D-модели локаций могут быть созданы талантливым 3D-художником, использующем специализированное программное обеспечение, такое как Blender, Autodesk 3ds Max, Cinema 4D (рис. 1). Возможно использование методов 3D-реконструкции, в которых используется специальное оборудование (лазерный сканер, лидар и т. д.) [3]. Другим способом является получение 3D-модели помещения при помощи алгоритмической оценки большого количества изображений. В частности, метод получения структуры из движения (structure-from-motion, SfM) [4] реконструирует облако точек с использованием сотен или тысяч изображений сцены. Далее облако точек должно быть трансформировано в полигональный вид, очищено от шума, текстурировано с использованием маппинга. Этот процесс очень трудоёмкий и медленный.

## Синтез ракурсов при помощи карты глубины (DIBR)

В качестве альтернативы вместо создания 3D-модели можно генерировать ракурсы на основе имеющихся. Технология синтеза ракурсов для виртуальной, дополненной и смешанной реальности подразумевает использование двух или более изображений с камер, установленных в определенных точках пространства, для получения различных изображений сцены с других точек обзора. В настоящее время алгоритмы визуализации виртуальных ракурсов в основном включают два метода: визуализацию на основе моделей (model based render, MBR) и визуализацию на основе изображений (image based render, IBR) [5]. Добавляя информацию о глубине в IBR, DIBR (depth image based render) значительно снижает требования к количеству исходных представлений и экономит место для хранения и пропускную способность канала связи, что вызвало в последние годы высокий интерес у исследователей [6]. Вариант алгоритма DIBR основывается на преобразовании перспективы изображения [7]. В этом случае необходимо совместить проекции в мировых координатах.

Виртуальный ракурс синтезируется из текстуры и соответствующей карты глубины. Сначала координаты точки на исходном изображении проецируются в мировые координаты с использованием соответствующих значений глубины. После этого промежуточные точки в пространстве проецируются на плоскость изображения виртуальной камеры, которая находится в желаемой позиции просмотра. Этот процесс называется деформированием трехмерного изображения.

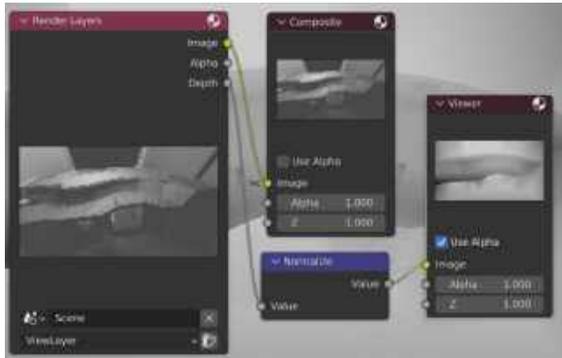


Рис. 2. Рендеринг текстурного изображения и карты глубины для модели служебного помещения

В предыдущих исследованиях принималось в расчёт, что одни и те же типы изображений 3D-объекта, полученные под углом, но с разными методами съёмки (параллельные или сходящиеся оси), не отличаются друг от друга при углах менее 5° [8]. Однако в задаче формирования виртуальных ракурсов для систем виртуальной и смешанной реальности возникает необходимость большего отклонения точки наблюдения. Кроме того, в системах VR возможно использование шести степеней свободы. Как правило используется формат MPEG-I системы координат OMAF (Omnidirectional Media Format) [9]. OMAF — это первый отраслевой стандарт для виртуальной реальности. Он определяет систему координат, используемую в приложениях виртуальной реальности, методы проецирования и упаковки по прямоугольным областям, хранение метаданных, инкапсуляцию, сигнализацию и потоковую передачу всенаправленных данных и, наконец, профили мультимедиа и профили представления. Система OMAF, направление перемещений представлена на рисунке 3.

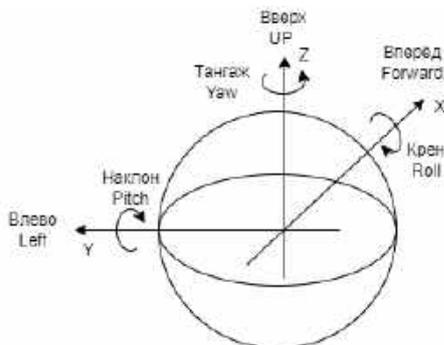


Рис. 3. Система координат, используемая в приложениях виртуальной реальности (OMAF)

Геометрические параметры камеры состоят из двух частей: внешние параметры и внутренние параметры. Внешние параметры определяют положение камеры в пространстве (вектор сдвига  $t$  3x1 и матрица поворота  $R$  3x3). Камера, направленная прямо имеет нулевые углы поворота. Матрица поворота соответствует трём степеням свободы:  $R = R_z(\text{yaw})R_y(\text{pitch})R_x(\text{roll})$ . Уравнение наблюдения (связь между трёхмерными координатами  $(X, Y, Z)^T$  точки и её положением на изображении  $(u, v)^T$ ) можно записать так: внутренние параметры, определяющие проецирование изображения на матрицу камеры. Сюда входят масштабирование по каждой из осей, угол между осями и коэффициенты искажения более высоких порядков (дисторсии). Для перспективной проекции входные изображения должны быть неискаженными. Следовательно, необходимо произвести операцию по устранению дисторсии. Эта операция производится путём умножения исходного изображения на матрицу внутренних параметров камеры (intrinsic parameters).

Точные собственные параметры, в том числе параметры дисторсии, можно вычислить при помощи калибровки с использованием снимков плоской шахматной доски или же, или непосредственно при реконструкции сцены (structure-from-motion, SfM) с извлечением внутренних параметров камеры. Использование шаблона дает более точные результаты, но требует дополнительного шага предварительной обработки.

После устранения искажений осталось только указать фокусное расстояние и главную точку. Эти значения указаны в пикселях, размер сенсора соответствует разрешению изображения. Фокусы задаются  $(f_x, f_y)$ , что соответствует горизонтальной и вертикальной осям. Основная точка  $(ppx, ppy)$  определяется из верхнего левого угла изображения, как показано на рисунке 4(а). Главная точка в центре изображения имеет значение, равное половине разрешения. В случае равнопрямоугольной проекции (рис. 4(б)) горизонтальный и вертикальный диапазоны обзора должны быть указаны в градусах. Для полного 360-градусного панорамного изображения диапазон по горизонтали составляет  $[-180, 180]$ , а по вертикали —  $[-90, 90]$ . Для изображения с углом обзора 180° горизонтальный и вертикальный диапазоны составляют  $[-90, 90]$ .

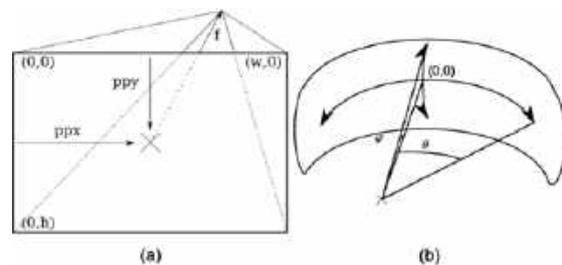


Рис. 4. Синтезированный вид с «трещинами» и «пустотами»

Положим,  $P = (R|t)$  – инверсная матрица положения камеры в мировых координатах размером 3x4, где  $R$  – матрица поворота, а  $t$  – матрица переноса:

$$P = (R|t) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $K$  – матрица внутренних параметров камеры размером  $3 \times 3$ :

$$K = \begin{pmatrix} f_z & 0 & pp_z \\ 0 & f_y & pp_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В гомогенных координатах точка  $X = (x, y, z, 1)^T$  на расстоянии  $D$  от визуального сенсора  $p_{in} = (u, v, 1)^T$ , проецируется на пиксел  $p_{in} = (u, v, 1)^T$  по формуле:

$$D p_{in} = K_{in} P_{in} X \quad (3)$$

Следовательно, используя входное изображение и значение глубины пикселя можно депроецировать  $X$ :

$$X = D(R_{in}| - \frac{t_{in}}{R_{in}})^T \frac{p_{in}}{K_{in}} \quad (4)$$

Это в свою очередь позволяет репроецировать  $X$  в на матрицу виртуальной камеры, используя (3):

$$p_{out} \sim D K_{out} P_{out} (R_{in}| - \frac{t_{in}}{R_{in}})^T \frac{p_{in}}{K_{in}} \quad (5)$$

Для получения значения пикселя следует поделить полученный вектор на третью координату (т.е. глубину точки в новом ракурсе). Применение этой операции к каждому пикселю входного изображения создает новое представление.

Основной принцип DIBR заключается в применении этого депроецирования и репроецирования ко всем пикселям входных изображений с использованием карты глубины. Такой подход позволяет получать виртуальные ракурсы в пространстве с шестью степенями свободы.

Трещины, возникающие при синтезе ракурсов при помощи DIBR, появляются по мере того, как пользователь виртуальной реальности движется вперед, увеличивает разрешение (масштабирование) или наблюдает за наклонными объектами. Эти трещины соответствуют пикселям в

виртуальном ракурсе, которые не имеют прообраза в исходном изображении (т. е. им не сопоставлен ни один входной пиксель). Однако, поскольку их соседние пиксели имеют прообраз, их цвет можно интерполировать. Другими словами, входные пиксели должны быть сопоставлены более чем с одним пикселем, чтобы компенсировать этот эффект. Это можно сделать с помощью техники суперпикселей [10], адаптируя размер пикселей к движению камеры [11] или связывая соседние пиксели для растеризации [12].

Даже если увеличение количества входных изображений может уменьшить количество окклюзий, это создает новые проблемы, поскольку эти виды должны быть согласованными по цвету, предполагаемой геометрии и предполагаемой позе. Важно отметить, что оценка глубины и смешивание нескольких изображений вместе зависят от согласованных цветов между изображениями. Поскольку не все датчики камер одинаковы, небольшие различия в цвете быстро приводят к несогласованным оценкам глубины или неоднородным цветовым пятнам во время смешивания изображений. Цветовая коррекция обычно требуется до синтеза ракурса [13] или на этапе смешивания [14].

Помимо трещин в процессе формирования ракурса возникают пустоты. Основная причина их появления - окклюзия, когда два объекта находятся примерно на одной линии, и объект, расположенный ближе к виртуальной камере или окну просмотра, частично или полностью закрывает видимость другого объекта (рис. 5). В последние годы было предложено множество алгоритмов для решения этих проблем. Но стандартные методы заполнения пустот не дают желаемых результатов.



Рис. 5. Синтезированный ракурс (слева), маска пустот и трещин (справа).

В качестве испытательных изображений в работе использован датасет, содержащий изображение стола с объектами разного рода [15], в который входит набор реальных ракурсов, смещённых относительно друг друга как в горизонтальном направлении, так и в вертикальном. Текстуры изображения имеют формат YUV с субдискретизацией 4:2:0, соответствующие им карты глубины в формате egr содержат данные об удалённости пикселей в миллиметрах в 16-битном представлении с плавающей запятой.

К датасету прилагается файл camera.json матрицами, характеризующими внутренние и внешние параметры камеры. В работе предложен

алгоритм получения виртуального ракурса из исходного текстурного изображения и соответствующей карты глубины с прилагаемой маской. Маска содержит маркеры для участков виртуального ракурса, которые не имеют однозначно определяемой текстуры. И если трещины на ракурсе могут быть успешно заполнены путём усреднения текстуры по области, то пустоты, возникающие из-за окклюзий, требуют более сложных алгоритмических вычислений. Как было сказано выше, для решения задачи часто применяются алгоритмы закрашивания пустот (inpaint), однако качество их работы сильно зависит от размера области и сложности скрываемой текстуры.

Авторами статьи предложено использование методов заполнения областей изображения с применением нейронной генеративной свёрточной сети [16]. Используемая нейросеть обучена на базе данных, содержащей 10 миллионов классифицированных изображений [17]. Одна из проблем заполнения пустот заключается в том, существует несколько кандидатов – вариантов заполнения. Оптимальные результаты должны быть ограничены пространственно-вариантным образом: пиксели, располагаемые близко к границе области пустот имеют малую вариативность, в то время как центральная часть области может быть менее ограничена. Фактически, составительная потеря используется для определения мультимодальности. К потерям применяются различные веса для согласованности границ, и основной задачей является определения оптимального веса, распределённого в пространстве. Результат работы алгоритма заполнения пустот на синтезированном ракурсе представлен на рисунке 6. Общая структура представляет собой генеративную многоколоночную свёрточную нейронную сеть (Generative Multi-column Convolutional Neural Network, GMCNN) для заполнения пустот на изображениях. В отличие от многомасштабных подходов, в которых используются изображения с измененным размером,

здесь напрямую используют входные данные с полным разрешением для характеристики представлений многомасштабных признаков в отношении глобальной и локальной информации. Вместо того, чтобы напрямую использовать функции совпадения признаков, которая может привести к визуальным артефактам, используется регуляризация. С исходным кодом проекта можно ознакомиться, обратившись к репозиторию [https://github.com/DufeRob/dibr\\_python](https://github.com/DufeRob/dibr_python).



Рис. 6. Синтезированный ракурс с заполненными пустотами

Таблица 1

Результаты сравнения DIBR-методов при помощи метрик похожести

Метрика подобия	Авторский метод	Fehn Interpolated	ICME	Незаполненные области
PSNR	36.95	36.87	31.33	30.57
SSIM	0.91	0.86	0.71	0.69
IW-SSIM	0.93	0.87	0.70	0.67

Для сравнения результатов работы предложенного авторами алгоритма выбраны наиболее часто используемые методы получения дополнительных ракурсов. Fehn С. и соавторы предлагают предварительную обработку карты глубины для устранения разрывов (Fehn interpolated), изображение глубины предварительно обрабатывается для устранения разрывов [7]. Метод ICME применяет предварительно синтезированные текстуры (патчи) для заполнения пустот на виртуальных ракурсах [18]. Таблица 1 показывает, что синтезированные ракурсы, полученные с помощью предложенного авторами метода, имеют хорошие показатели сходства с реальными ракурсами в соответствии с такими показателями, как структурное сходство (SSIM) и SSIM-мера, взвешенная по содержанию информации (IW-SSIM) [19].

### Заключение

От точности позиционирования полученных ракурсов в мировых координатах зависит степень иммерсивности системы в целом, и как следствие качество обучения экипажа, поэтому так важно совмещать синтезированные ракурсы с элементами киберфизических систем в сознании обучаемого, демонстрировать ему виртуальное пространство,

максимально соответствующее реальному. Способ заполнения пустот в виртуальном ракурсе может зависеть от величины перепада уровня глубины. Однако уже сейчас применение генеративно-составительных свёрточных нейронных сетей позволяет произвести бесшовное заполнение вскрывающегося пространства на изображении. Выбор оптимального уровня минимального порога, обучение нейронных сетей на базе изображений, содержащих преимущественно технических помещений, является целью дальнейших исследований. Рендеринг на основе изображения глубины можно использовать для создания морского симулятора VR. Этот метод не требует сложного 3D моделирования. Карту глубины можно получить с помощью таких устройств, как Intel RealSense, Microsoft Kinect, некоторых моделей смартфонов и других времяпролетных (Time of Flight, сокр. TOF) и лидар-устройств. Кроме того, карта глубины может быть создана из стереопары цветных изображений. Предложенный перечень средств позволяет с минимальными трудозатратами и в короткие сроки создавать киберфизические системы, способные эмулировать полный цикл подготовки экипажей морских судов.

### Литература

1. Rall M., Manser T., Howard S.K. Key elements of debriefing for simulator training // European Journal of Anaesthesiology. 2000. Vol. 17, № 8. P. 516–517.
2. Markopoulos E. et al. Maritime Safety Education with VR Technology (MarSEVR). 2019.

3. Kang Z. et al. A Review of Techniques for 3D Reconstruction of Indoor Environments: 5 // ISPRS International Journal of Geo-Information. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 9, № 5. P. 330.
4. Agarwal S. et al. Building Rome in a day // Commun. ACM. 2011. Vol. 54, № 10. P. 105–112.
5. Merkle P. et al. The effects of multiview depth video compression on multiview rendering // Signal Processing: Image Communication. 2009. Vol. 24, № 1–2. P. 73–88.
6. Hannuksela M.M. et al. Multiview-Video-Plus-Depth Coding Based on the Advanced Video Coding Standard // IEEE Transactions on Image Processing. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013. Vol. 22, № 9. P. 3449–3458.
7. Fehn C. Depth-image-based rendering (DIBR), compression, and transmission for a new approach on 3D-TV / ed. Woods A.J. et al. San Jose, CA, 2004. P. 93–104.
8. Tataronkov D.A. et al. Application of cyber-physical systems for safety training of personnel of the marine on-board simulator // MORSKIE INTELLEKTUAL'NYE TEHNOLOGII). 2020. № 4(50). P. 209–213.
9. Omnidirectional Media Format | MPEG [Electronic resource]. URL: <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-i/omnidirectional-media-format> (accessed: 13.06.2022).
10. Tehrani M.P. et al. Free-viewpoint image synthesis using superpixel segmentation // SIP. Now Publishers, Inc., 2017. Vol. 6, № 1.
11. Senoh T., Tetsutani N., Yasuda H. Depth Estimation and View Synthesis for Immersive Media. 2018. P. 1–8.
12. Fachada S. et al. DEPTH IMAGE BASED VIEW SYNTHESIS WITH MULTIPLE REFERENCE VIEWS FOR VIRTUAL REALITY // 2018 - 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON). 2018.
13. Fecker U., Barkowsky M., Kaup A. Histogram-Based Prefiltering for Luminance and Chrominance Compensation of Multiview Video // Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on. 2008. Vol. 18. P. 1258–1267.
14. Dziembowski A., Domański M. ADAPTIVE COLOR CORRECTION IN VIRTUAL VIEW SYNTHESIS // 2018 - 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON). 2018.
15. Bonatto D., Fachada S., Lafrait G. ULB ToysTable. Zenodo, 2021.
16. Wang Y. et al. Image Inpainting via Generative Multi-column Convolutional Neural Networks. P. 10.
17. Zhou B. et al. Places: A 10 Million Image Database for Scene Recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. Vol. 40, № 6. P. 1452–1464.
18. Ndjiki-Nya P. et al. Depth Image-Based Rendering With Advanced Texture Synthesis for 3-D Video // IEEE Transactions on Multimedia. 2011. Vol. 13, № 3. P. 453–465.
19. Wang X. et al. Deep Blind Synthesized Image Quality Assessment with Contextual Multi-Level Feature Pooling // 2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Taipei, Taiwan: IEEE, 2019. P. 435–439.

#### References

1. Rall M., Manser T., Howard S.K. Key elements of debriefing for simulator training // European Journal of Anaesthesiology. 2000. Vol. 17, № 8. P. 516–517.
2. Markopoulos E. et al. Maritime Safety Education with VR Technology (MarSEVR). 2019.
3. Kang Z. et al. A Review of Techniques for 3D Reconstruction of Indoor Environments: 5 // ISPRS International Journal of Geo-Information. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 9, № 5. P. 330.
4. Agarwal S. et al. Building Rome in a day // Commun. ACM. 2011. Vol. 54, № 10. P. 105–112.
5. Merkle P. et al. The effects of multiview depth video compression on multiview rendering // Signal Processing: Image Communication. 2009. Vol. 24, № 1–2. P. 73–88.
6. Hannuksela M.M. et al. Multiview-Video-Plus-Depth Coding Based on the Advanced Video Coding Standard // IEEE Transactions on Image Processing. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013. Vol. 22, № 9. P. 3449–3458.
7. Fehn C. Depth-image-based rendering (DIBR), compression, and transmission for a new approach on 3D-TV / ed. Woods A.J. et al. San Jose, CA, 2004. P. 93–104.
8. Tataronkov D.A. et al. Application of cyber-physical systems for safety training of personnel of the marine on-board simulator // MORSKIE INTELLEKTUAL'NYE TEHNOLOGII). 2020. № 4(50). P. 209–213.
9. Omnidirectional Media Format | MPEG [Electronic resource]. URL: <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-i/omnidirectional-media-format> (accessed: 13.06.2022).
10. Tehrani M.P. et al. Free-viewpoint image synthesis using superpixel segmentation // SIP. Now Publishers, Inc., 2017. Vol. 6, № 1.
11. Senoh T., Tetsutani N., Yasuda H. Depth Estimation and View Synthesis for Immersive Media. 2018. P. 1–8.
12. Fachada S. et al. DEPTH IMAGE BASED VIEW SYNTHESIS WITH MULTIPLE REFERENCE VIEWS FOR VIRTUAL REALITY // 2018 - 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON). 2018.
13. Fecker U., Barkowsky M., Kaup A. Histogram-Based Prefiltering for Luminance and Chrominance Compensation of Multiview Video // Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on. 2008. Vol. 18. P. 1258–1267.
14. Dziembowski A., Domański M. ADAPTIVE COLOR CORRECTION IN VIRTUAL VIEW SYNTHESIS // 2018 - 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON). 2018.
15. Bonatto D., Fachada S., Lafrait G. ULB ToysTable. Zenodo, 2021.
16. Wang Y. et al. Image Inpainting via Generative Multi-column Convolutional Neural Networks. P. 10.
17. Zhou B. et al. Places: A 10 Million Image Database for Scene Recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. Vol. 40, № 6. P. 1452–1464.

18. Ndjiki-Nya P. et al. Depth Image-Based Rendering With Advanced Texture Synthesis for 3-D Video // IEEE Transactions on Multimedia. 2011. Vol. 13, № 3. P. 453–465.
19. Wang X. et al. Deep Blind Synthesized Image Quality Assessment with Contextual Multi-Level Feature Pooling // 2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Taipei, Taiwan: IEEE, 2019. P. 435–439.

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

**Дмитрий Александрович Татаренков**, ст. преподаватель кафедры телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. 196105, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, e-mail: dtatarenkov@outlook.com

**Dmitriy A. Tatarenkov**, senior lecturer, Television and Metrology Dept., The Bonch-Bruevich St.Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshhevik Pt., St. Petesburg, 193232, Russian Federation, e-mail: dtatarenkov@outlook.com

**Глеб Гендрихович Рогозинский**, доктор технических наук, начальник НОЦ «Медиацентр» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com

**Gleb G. Rogozinsky**, Dr. Sci. (Eng), Head of Medialabs, The Bonch-Bruevich St.Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshhevik Pt., St. Petesburg, 193232, Russian Federation; leading researcher, Laboratory of Transportation Ecology, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com

**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; Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, 149, Moskovskiy avenue, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: malygin\_com@mail.ru

**Александра Александровна Кутлярова**, специалист в области мультимедиа, факультет экранных искусств, Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, 191119, Санкт-Петербург, ул. Правды, 13; mr.echelon17@gmail.com

**Alexandra A. Kutlyarova**, multimedia specialist, Screen Arts Department, Saint-Petersburg State Institute of Film and Television, 13 Pravdy St., 191119, Russian Federation; e-mail: mr.echelon17@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2022.

Научная статья

УДК 519.7, 004

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.031>

## Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов

В.А. Ушаков<sup>1,2</sup> [mr.vitaly.ushakov@yandex.ru](mailto:mr.vitaly.ushakov@yandex.ru)

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

**Аннотация.** В работе представлено решение задачи программного управления (планирования) информационными процессами), происходящими при взаимодействии (функционировании) группировки подвижных объектов. В общем случае информационные процессы включают в себя процессы получения подвижными объектами информации о контролируемых объектах, ее предварительной и вторичной обработки, хранения (если нет возможности ее передать конечным потребителям), а также процессы передачи и приема информации конечным потребителям. Цель решения рассматриваемой задачи состоит в повышении оперативности и качества управления указанными информационными процессами в интересах обеспечения своевременного и обоснованного принятия решения о состоянии контролируемых объектов. Обычно данная задача решается в автоматизированном (человеко-машинном) режиме с использованием различных моделей. Среди них традиционно выделяют либо статические модели, для которых характерны большие размерности и трудности учета времени, либо логико-динамические модели, в которых учет технологий управления информационными процессами приводит к необходимости их описания с использованием соответствующих фазовых ограничений. Для решения поставленной задачи разработаны модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии рассматриваемых подвижных объектов. В основу разработанного метода исследования процессов информационного взаимодействия подвижных объектов положена многоэтапная координационно-итерационная процедура взаимодействия построенных статических и динамических моделей, описывающих данную предметную область. В статической модели происходит привязка операций, входящих в состав информационных процессов, к подвижным объектам, а в динамической модели проводится привязка уже распределенных по подвижным объектам информационных операций ко времени. Конечным результатом данной работы являются разработанные и реализованные на программном уровне модели и алгоритмы планирования информационных процессов с использованием Matlab language и Matlab app designer, работоспособность которых была проверена на ряде тестовых примеров.

**Ключевые слова:** Программное управление, информационный процесс, подвижный объект, контролируемый объект, статическая модель, динамическая модель, группировка подвижных объектов, линейное программирование, целочисленное линейное программирование, принцип максимума Л.С. Понтрягина.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках работы над кандидатской диссертацией. Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 19-38-90221 и 20-08-01046, в рамках бюджетной темы № FFZF-2022-0004.

**Для цитирования:** Ушаков В.А. Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 235—247.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.031>

## Models and algorithms for controlling information processes in the moving objects interaction

Vitaly A. Ushakov<sup>1,2</sup> [mr.vitaly.ushakov@yandex.ru](mailto:mr.vitaly.ushakov@yandex.ru)

<sup>1</sup>St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

<sup>2</sup>St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russian Federation

**Abstract.** The paper presents a solution to the program control task for information processes (planning) occurring during the interaction (functioning) of moving objects group. In general, information processes include the obtaining information processes about controlled objects by moving objects, its preliminary and secondary processing, storage (if it is not possible to transfer it to end users), as well as the transmitting and receiving information processes to end users. The purpose for solving the task under consideration is to increase the efficiency and control quality for these information processes in the interests for ensuring timely and reasonable decision-making on the controlled objects state. Usually, this task is solved in an automated (man-machine) mode using various models. Among them, traditionally, either static models are distinguished, which are characterized by large dimensions and difficulties in accounting for time, or logical-dynamic models, in which taking into account information process control technologies leads to the need to describe them using the appropriate phase constraints. To solve this task, models and algorithms for controlling information processes in the interaction for the considered moving objects have been developed. The developed method for studying the information processes interaction for moving objects is based on a multi-stage coordination-iterative procedure for the interaction for the constructed static and dynamic models that describe this subject area. In the static model, the operations that are part for the information processes are linked to moving objects,

and in the dynamic model, the information operations already distributed over the moving objects are linked to time. The end result at this work is the models and algorithms developed and implemented at the software level using the Matlab language and Matlab app designer, the performance which was tested on a test cases number.

**Key words:** Matlab, program control, information process, moving object, controlled object, static model, dynamic model, moving objects grouping, linear programming, integer linear programming, Pontryagin's maximum principle.

**Financial Support:** The study was carried out in the framework of the candidate dissertation. The reported study was funded by RFBR, projects number 19-38-90221 and 20-08-01046, state research FFZF-2022-0004.

**For citation:** Vitaly A. Ushakov Models and algorithms for controlling information processes in the moving objects interaction, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 235—247.

## Введение

В современных условиях большую роль начинают играть группировки подвижных объектов (ПДО). ПДО могут являться космические аппараты (КА) [1], летательные аппараты (ЛА), в том числе и беспилотные (БПЛА), наземные робототехнические комплексы, морские робототехнические комплексы [2] и т. д. Они, как правило, для выполнения поставленных целевых задач (ЦЗ) объединяются в группировки, т.к. информационно-технологические возможности каждого отдельного ПДО весьма ограничены. Предполагается, что на борту каждого ПДО, входящего в группировку, имеется запоминающее устройство (ЗУ), приемно-передающее устройство, устройство обработки данных с соответствующим программно-математическим и информационным обеспечением. В качестве примера такой группировки рассмотрим сеть ПДО, каждый из которых может решать как задачи получения информации о состоянии контролируемых объектов (КНО), так и задачи обработки, хранения, передачи (ретрансляции), полученных обработанных (необработанных) данных и информации конечным потребителям (КНП).

В виду многоальтернативности организации рассматриваемых ИнП особую актуальность приобретает задача выбора наилучшей технологии и соответствующего плана (программы) управления ИнП, обеспечивающих повышение оперативности и качества управления данными информационными процессами (ИнП) в интересах обеспечения своевременного и обоснованного принятия решения о состоянии КНО.

### 1. Содержательная постановка задачи программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов

Для решения задачи, описанной во введении, считаем, что известна группировка ПДО, где для каждого конкретного объекта известны: максимальные объемы запоминающих ЗУ ПДО; максимальные производительности вычислительных средств (ВСр) ПДО; максимальные пропускные способности каналов приема/передачи данных между ПДО; минимально/максимально возможные значения интенсивности (скорости) приема/передачи и обработки данных в ПДО; пропускные способности каналов приема/передачи и обработки данных в ПДО. Кроме того, нам известны следующие параметры операций, которые определяют структуру соответствующих ИнП, а именно объемы информации о состоянии КНО, которые поступают в

ПДО; длительность подынтервалов постоянства структур ПДО на конкретном интервале времени; директивные сроки окончания выполнения операций, входящих в ИнП; штрафные функции за нарушение директивных сроков и сами структуры возможного информационного взаимодействия ПДО на каждом из подынтервалов. Предполагается, что каждый ПДО оборудован унифицированной многофункциональной аппаратурой, предназначенной для выполнения основных ИнП, а именно хранения, приема, передачи и обработки данных.

Необходимо, используя перечисленные исходные данные построить программу управления ИнП (план), которые реализуются при взаимодействии ПДО, наилучшую с точки зрения заданных показателей качества. К указанным показателям качества будем относить показатель общего объема переданных и обработанных данных, показатель, характеризующий потери данных, показатель, характеризующий качество обработанных данных и своевременность обработки данных.

Предварительный анализ показывает, что исследуемая задача программного управления (планирования) ИнП является большемерной, характеризуется сложными нелинейными нестационарными пространственно-временными техническими и технологическими ограничениями, а также требует особого подхода к учету факторов неопределенности, вызванных воздействиями факторов внешней среды и ее многокритериальным описанием [3]. Поэтому для ее решения предлагается следующая обобщенная многоэтапная декомпозиционно-координационная процедура, включающая в себя этап поиск агрегированного плана функционирования группировки ПДО на основе СМ, а также детальных программ управления ИнП с привязкой к каждой операции, входящей в каждый процесс, соответствующего ПДО ко времени.

Для конструктивного описания обобщенной процедуры введем следующие переменные, константы и обозначения, которые используются как в статической модели (СМ), так и в динамической модели (ДМ).

Пусть  $A$  – ПДО, где  $A_i, A_j \in \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ ,

причем  $i, j$  – индексы ПДО, а  $n$  их количество;  $\rho$  – тип данных (поток), для которого параметр  $P$  – количество типов данных (потоков).

Пусть структура и характеристики ПДО изменяются в дискретные моменты времени  $(0, t_1, t_2, \dots, T)$ , разбивающие весь интервал времени  $t \in (0, T]$  (интервал планирования) на подынтервалы (участки), соответствующие постоянству структуры

группировки ПдО. Сопоставим произвольному подынтервалу  $(t_{oi}, t_{fi}] = T_l^{(o,1)}$  номер  $l$  (его индекс), при этом  $l = 1, \dots, L$ , где  $L$  – количество участков, причем  $t_{oi}$  – начальный момент времени подынтервала постоянства структуры,  $t_{fi}$  – конечный момент времени участка постоянства структуры.

## 2. Статическая модель и алгоритм планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов

### 2.1. Содержательная постановка задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов

Для СМ [4], о которой речь пойдет ниже программа управления ИнП представляет собой план выполнения операций на заданных участках постоянства структур. Продолжим детализацию для СМ вводя дополнительные переменные, константы и ограничения. Введем обозначения для характеристик ПдО:  $v_j$  – максимально возможный объем ЗУ в  $A_j$  ПдО;  $\varphi_{jl}$  – максимальная интенсивность обработки данных в  $A_j$  ПдО;  $\psi_{ijl}$  – максимальная интенсивность передачи данных между  $A_i$  и  $A_j$  ПдО. Для проведения дальнейшей формализации добавим следующие переменные:  $x_{jl}^{(вх)}$  – количество данных, поступивших из внешней среды в  $A_j$  ПдО на  $l$ -м подынтервале времени;  $x_{ij\rho l}$  – количество данных, переданных из  $A_i$  ПдО в  $A_j$   $\rho$ -го типа на  $l$ -м участке времени;  $y_{j\rho l}$ ,  $g_{j\rho l}$ ,  $z_{j\rho l}$  – переменные, характеризующие каждая соответственно: объем данных  $\rho$ -го типа на  $l$ -м подынтервале, который может быть записан (согласно плану работы группировки ПдО) в ЗУ  $A_j$  ПдО, либо обработан (согласно характеристикам аппаратуры) в  $A_j$  ПдО, либо потерян в  $A_j$  ПдО (из-за ограниченной пропускной способности каналов связи). Кроме того, пусть  $M_{jl}^-$  – множество номеров ПдО, из которых в  $A_j$  ПдО на  $l$ -м участке времени передаются данные, а  $M_{jl}^+$  – множество номеров ПдО, в которые передаются данные из  $A_j$  ПдО на  $l$ -м подынтервале времени;  $k_\rho$  – коэффициент, характеризующий степень обработки информации. Также отметим, что  $I_1$  – показатель полноты обработки данных в группировке ПдО,  $I_2$  – показатель потери данных в группировке ПдО,  $I_0$  – обобщенный показатель качества планирования ИнП, а  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты важности

показателей (задаются лицом, принимающим решение (ЛПР)).

Необходимо подчеркнуть, что в реальных условиях происходит обмен разнородными данными, имеющими различную степень важности и срочности. Для этого при введении соответствующих переменных будем учитывать, что обработанные данные – информация ( $\rho = 2$ ), необработанные данные – данные ( $\rho = 1$ ).

### 2.2. Статическая модель планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов

С учетом вышеизложенного СМ планирования ИнП при взаимодействии ПдО примет следующий вид:

Целевая функция (ЦФ):

$$I_1 + I_2 = I_0 \rightarrow \max, \quad (2.1)$$

$$\text{где } I_1 = \alpha_1 \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L g_{j\rho l}, \quad I_2 = -\alpha_2 \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L z_{j\rho l},$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \alpha_1, \alpha_2 \geq 0$$

Математическая модель планирования ИнП при взаимодействии ПдО:

$$x_{jl}^{(вх)} = \left( \sum_{i \in M_{jl}^+} x_{ij\rho l} - \sum_{i \in M_{jl}^-} x_{ij\rho l} \right) + (y_{j\rho l} - y_{j\rho(l-1)}) + g_{j\rho l} + z_{j\rho l}, \quad \forall \rho, \forall j, \forall l \quad (2.2)$$

Технические ограничения:

$$0 \leq \sum_{\rho \in P} x_{ij\rho l} \leq \psi_{ijl}, \quad \forall i, \forall j, \forall l; \quad (2.3)$$

$$0 \leq \sum_{\rho \in P} (y_{j\rho l} + g_{j\rho l}) \leq v_j, \quad \forall j, \forall l; \quad (2.4)$$

$$0 \leq \sum_{\rho \in P} g_{j\rho l} \leq \varphi_{jl}, \quad \forall j, \forall l; \quad (2.5)$$

$$0 \leq z_{j\rho l}. \quad (2.6)$$

$$g_{j(\rho+1)l} = k_\rho g_{j\rho l}, \quad \forall \rho, \forall j, \forall l \quad (2.7)$$

При формировании плана работы группировки ПдО поиск наилучшей альтернативы осуществляется исходя из оптимизации  $I_0$  в ЦФ (2.1). Из анализа СМ следует, что в рамках предложенной формализации задача планирования ИнП при взаимодействии ПдО сводится к многокритериальной задаче линейного программирования (ЛП) большой размерности. Дополнительная особенность данной задачи управления состоит в том, что на переменные  $x_{ij\rho l}$ ,  $y_{j\rho l}$ ,  $g_{j\rho l}$  накладываются двухсторонние ограничения (2.3 – 2.6). Кроме того, структурные особенности данной задачи позволяют ее декомпозировать по числу подынтервалов постоянства структуры, а взаимодействие между этими декомпозированными задачами (моделями) будет поддерживаться за счет переменных  $y_{j\rho l}$  и  $y_{j\rho(l-1)}$ , которые обеспечивают взаимосвязь между подынтервалами. Для преодоления проблемы многокритериальной неопределенности в задаче планирования ИнП применен вариант скаляризации

векторного показателя качества планирования, основанный на линейной свертке частных показателей. Разбиение на подынтервалы постоянства структуры осуществляется исходя из физики решаемой задачи. Так, например, для КА, как одного из видов ПДО данные участки определяются спецификой орбиты, на которой он находится, для БПЛА данные участки определяются принятым способом их применения.

### 2.3. Алгоритм формирования плана информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов

Проведенный анализ показывает, что задача планирования ИнП при взаимодействии ПДО, сведенная к многокритериальной задаче ЛП, имеет большую размерность, поэтому предлагается следующая декомпозиция процесса ее решения. Используя разработанную СМ предлагается реализовать следующий алгоритм построения агрегированного плана организации информационных взаимодействий ПДО:

**Шаг 1.** Получение исходных данных от пользователя через интерактивный графический интерфейс или автоматически с помощью генератора исходных данных для формирования ограничений вида (2.3) – (2.7), а также задания планируемых объемов данных, поступающих в группировку извне на каждом участке постоянства структуры  $x_{ij}^{(vx)}$ .

**Шаг 2.**  $l = 1$ . Интерпретация исходных данных для решения задачи планирования ИнП при взаимодействии ПДО, сведенной к многокритериальной задаче ЛП большой размерности.

**Шаг 3.** Решение многокритериальной задачи ЛП большой размерности с помощью Matlab.

**Шаг 4.** Формирование результатов решения задачи ЛП, полученных на  $l$ -ом подынтервале постоянства структуры (объем данных, который был сохранен в ЗУ на  $l$ -ом подынтервале на следующем участке будет храниться в  $y_{j\rho(l-1)}$ ), и представление

их в удобном для последующего использования виде (в частности, на последующих подынтервалах постоянства структуры).

**Шаг 5.** Если  $l \leq L$ , то  $l = l + 1$ , возврат на шаг 2 и повторение шагов 2-5, иначе переход на шаг 6.

**Шаг 6.** Формирование и интерпретация выходных результатов, представление их в удобном для последующего использования виде (например, для дальнейшего применения в ДМ программного управления ИнП при взаимодействии ПДО).

**Шаг 7.** Визуализация структурной динамики ПДО, сформированной с помощью СМ.

Разработанные СМ и алгоритм планирования ИнП при взаимодействии ПДО, позволяют решать различные варианты задач оперативного планирования (программного управления) рассматриваемыми процессами для различных сценариев реализации соответствующей структурной динамики конкретной группировки ПДО. В результате решения указанных задач формируются массивы выходной информации о переданных данных между ПДО, а также

сохраненных, обработанных и потерянных в ЗУ ПДО данных на каждом подынтервале постоянства структуры.

Дальнейшая детализация полученного плана работы группировки ПДО предлагается выполнять уже с использованием детерминированной ДМ программного управления ИнП при взаимодействии ПДО. Для этого количество данных, переданное между ПДО на каждом участке времени  $x_{ij\rho l}$ , а также

объем данных, который был обработан в каждом ПДО на каждом подынтервале времени  $g_{j\rho l}$

передаются в разработанную ДМ, о которой речь пойдет в следующем разделе статьи.

## 3. Динамическая модель и алгоритм программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов

### 3.1. Общая информация

Детерминированная ДМ программного управления процессами приема, передачи, обработки и хранения данных и информации, при взаимодействии ПДО была разработана на основе [5,6]. ДМ из [7] представлена использована для создания [8, 9]. В предлагаемой ДМ более детально представлена технология функционирования группировки ПДО, в рамках которой осуществляется описание ИнП с привязкой ко времени, а также учитываются логические ограничения.

### 3.2. Математическая модель программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов

Продолжим детализацию для ДМ вводя дополнительные переменные, константы и ограничения.

$$\dot{x}_l^{(o,1)}(t) = u_l^{(o,1)}(t); \quad (3.1)$$

$$\dot{x}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) = u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_{j\rho l}^{(n,2)}(t) = u_{j\rho l}^{(n,2)}(t); \quad (3.3)$$

$$\dot{x}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) = \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \quad (3.4)$$

$$\dot{x}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) = \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t). \quad (3.5)$$

Вспомогательная модель (3.1) показывает на каком участке постоянства структуры находится группировка ПДО; (3.2) – потоковая модель программного управления приема/передачи данных; (3.3) – потоковая модель программного управления обработки данных; (3.4) – вспомогательная модель, позволяющая определить направление приема/передачи данных; (3.5) – вспомогательная модель, позволяющая определить в каком ПДО осуществляется обработка заданного типа (потока) данных.

Поясним параметры моделей (3.1) – (3.5):  $x_l^{(o,1)}$  – длительность нахождения группировки ПДО на  $l$ -м участке постоянства структуры;  $x_{ij\rho l}^{(n,1)}$  – количество данных типа  $\rho$ , переданных из  $A_i$  ПДО в  $A_j$  на  $l$ -

м подынтервале;  $x_{ij\rho l}^{(n,2)}$  – количество данных типа  $\rho$ , обработанных в  $A_j$  ПДО на  $l$ -м участке;  $x_{ij\rho l}^{(n,3)}$  – вспомогательная переменная, которая равна длительности интервала времени приема/передачи данных типа  $\rho$  от  $A_i$  ПДО к  $A_j$  на  $l$ -м подынтервале;  $x_{ij\rho l}^{(n,4)}$  – вспомогательная переменная, которая равна продолжительности обработки данных типа  $\rho$  в  $A_j$  ПДО на  $l$ -м участке;  $u_i^{(o,1)}(t)$  – булева переменная, значение которой соответствует смене или сохранению текущего подынтервала постоянства структуры;  $u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  – интенсивность (скорость) приема/передача данных типа  $\rho$  от  $A_i$  ПДО к  $A_j$  на  $l$ -м участке;  $u_{ij\rho l}^{(n,2)}(t)$  – интенсивность (скорость) обработки данных типа  $\rho$  в  $A_j$  ПДО на  $l$ -м подынтервале;  $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  – управляющее воздействие для приема/передачи данных;  $\omega_{ij\rho l}^{(n,2)}(t)$  – управляющее воздействие для обработки данных.

Таким образом, сформирована математическая модель программного управления ИНП при взаимодействии ПДО, которая позволяет детализировать агрегированный план, полученный на СМ планирования ИНП при взаимодействии ПДО с привязкой его ко времени.

**3.3. Технические и технологические ограничения математической модели программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов**

$$u_i^{(o,1)}(t)(T_i^{(o,1)} - \dot{x}_i^{(o,1)}(t)) = 1; \tag{3.6}$$

$$0 \leq u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq c_{ij\rho l}^{(n,1)} \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \tag{3.7}$$

$$0 \leq u_{ij\rho l}^{(n,2)}(t) \leq c_{ij\rho l}^{(n,2)} \omega_{ij\rho l}^{(n,2)}(t); \tag{3.8}$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{ij\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \forall l; \forall j; \forall \rho; \tag{3.9}$$

$$\sum_{\rho=1}^P u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq d_{ijl}^{(1)} \xi_{ij}^{(b,1)}; \tag{3.10}$$

$$\sum_{\rho=1}^P u_{ij\rho l}^{(n,2)}(t) \leq d_{ijl}^{(2)} \xi_j^{(b,2)}; \tag{3.11}$$

$$0 \leq u_i^{(o,1)}(t) \leq 1. \tag{3.12}$$

$$0 \leq \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq 1. \tag{3.13}$$

$$0 \leq \omega_{ij\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1. \tag{3.14}$$

$$0 \leq \xi_{ij}^{(b,1)} \leq 1. \tag{3.15}$$

$$0 \leq \xi_j^{(b,2)} \leq 1. \tag{3.16}$$

Ограничение (3.6) задает упорядоченную последовательность временных подынтервалов, соответствующих постоянству структур. Неравенства (3.7) и (3.8) задают ограничения, накладываемые на максимальную и минимальную интенсивность (скорость) приема/передачи и обработки данных в ПДО соответственно, где  $c_{ij\rho l}^{(n,1)}$  и  $c_{ij\rho l}^{(n,2)}$  – заданные константы, выбранные таким образом, чтобы они соответствовали параметрам  $\psi_{ijl}$  и  $\varphi_{jil}$  из СМ.

Ограничение (3.9) определяет технологию работы  $A_j$  ПДО, которая состоит в следующем: полученные от других ПДО данные типа  $\rho$  либо передаются в другие ПДО ( $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) = 1$ ), либо обрабатываются в данном ПДО ( $\omega_{ij\rho l}^{(n,2)}(t) = 1$ ). Ограничения (3.10), (3.11) определяют текущие (дифференциальные) пропускные способности ПДО, где:  $d_{ijl}^{(1)}$  и  $d_{jil}^{(2)}$  – пропускные способности каналов приема/передачи и обработки данных ПДО соответственно, функции  $\xi_{ij}^{(b,1)}$ ,  $\xi_j^{(b,2)}$  ((3.15)-(3.16)) задают возможные варианты возмущающих воздействий (целенаправленных, индифферентных, неизвестных, либо их комбинаций) на соответствующие компоненты группировки ПДО со стороны внешней среды. Ограничения (3.12)-(3.14) определяют множество возможных значений, которые принимают переменные  $u_i^{(o,1)}(t)$ ,  $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$ ,

$\omega_{ij\rho l}^{(n,2)}(t)$ , где  $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  – вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение 1, если принимается решение о передаче данных типа  $\rho$  из  $A_i$  ПДО в  $A_j$ , 0 – в противоположном случае;  $\omega_{ij\rho l}^{(n,2)}(t)$  – вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение 1, если принимается решение об обработке данных в  $A_j$  ПДО, 0 – в противоположном случае.

**3.4. Краевые условия**

В начале подынтервала планирования будем предполагать, что в ПДО отсутствуют данные, поэтому должно выполняться соотношение:

$$\begin{aligned} x_i^{(o,1)}(t_{0l}) &= x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{0l}) = x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{0l}) = \\ &= x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{0l}) = x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{0l}) = 0 \end{aligned} \tag{3.17}$$

В момент времени  $t = t_{fl}$  должны выполняться следующие соотношения:

$$x_i^{(o,1)}(t_{fl}) = T_i^{(o,1)}; \tag{3.18}$$

$$\sum_{\rho=1}^P x_{ij\rho}^{(n,1)}(t_{fl}) = x_{ijl}; \quad \sum_{\rho=1}^P x_{j\rho}^{(n,2)}(t_{fl}) = g_{jl}; \quad (3.19)$$

$$x_{ij\rho}^{(n,3)}(t_{fl}) \in R^+; \quad x_{j\rho}^{(n,4)}(t_{fl}) \in R^+; \quad (3.20)$$

Соотношение (3.17) означает, что все моменты времени должны быть пройдены, а (3.18)–(3.20) задают краевые условия, накладываемые на компоненты вектора  $\mathbf{X}(t)$ , определяющего состояния группировки ПдО, в момент времени  $t = t_{fl}$ , таким образом, что необходимо обработать и принять/передать не меньше определенного количества данных.

### 3.5. Показатели качества программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов

Для поиска оптимальных программ управления ИнП, реализуемых при взаимодействии ПдО, введем следующие показатели качества:

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L [\Gamma_l^{(o,1)} - x_l^{(o,1)}(t_{fl})]^2; \quad (3.21)$$

$$J_2 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \int_{t_{ol}}^{t_{fl}} \gamma_{j\rho l}(t) \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) dt; \quad (3.22)$$

$$J_3 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \int_{t_{ol}}^{t_{fl}} \beta_{j\rho l}(t) \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) dt; \quad (3.23)$$

$$J_4 = \frac{1}{2} \left[ \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( x_{ijl} - \sum_{\rho=1}^P x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl}) \right)^2 + \sum_{j \neq i} \left( g_{jl} - \sum_{\rho=1}^P x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl}) \right)^2 \right]; \quad (3.24)$$

$$J_5 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \left( \Gamma_l^{(o,1)} - x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{fl}) \right)^2; \quad (3.25)$$

$$J_6 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \left( \Gamma_l^{(o,1)} - x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{fl}) \right)^2. \quad (3.26)$$

Показатель (3.21) позволяет оценить полноту выполнения краевых условий при моделировании временных интервалов на которых наблюдается постоянство технической структуры, обеспечивающей взаимодействие ПдО. Показатель (3.22) – суммарный штраф за нарушение директивных сроков выполнения операций, в рамках соответствующих ИнП ( $\gamma_{j\rho l}(t)$  – директивные сроки качества выполнения операций). Показатель (3.23) – суммарное интегральное качество выполненных операций, входящих в соответствующие ИнП ( $\beta_{j\rho l}(t)$  – штрафная функция). Показатель (3.24) позволяет оценить выполнение краевых условий (3.19) (по сути, функционал Майера). С помощью функционалов (3.25) и (3.26) удается обеспечить равномерность (неравномерность) использования ресурсов ПдО для каждого подынтервала постоянства структур.

### 3.6. Сопряженная система дифференциальных уравнений и условия трансверсальности

В соответствии с принципом максимума Л.С. Понтрягина каждой основной системе уравнений с использованием функции Гамильтониана (3.37) может быть сопоставлена сопряженная система уравнений. Исходя из моделей (3.1) – (3.5) введем сопряженную систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{\eta}_l^{(o,1)}(t) = 0; \quad (3.27)$$

$$\dot{\eta}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) = 0; \quad (3.28)$$

$$\dot{\eta}_{j\rho l}^{(n,2)}(t) = 0; \quad (3.29)$$

$$\dot{\eta}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) = 0; \quad (3.30)$$

$$\dot{\eta}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) = 0. \quad (3.31)$$

Краевые условия для (3.27)–(3.31) в момент времени  $t = t_{fl}$  определяются из условий трансверсальности (3.32)–(3.36). Для сопряженной системы дифференциальных уравнений краевые условия на «правом» конце определяются из следующих соотношений:

$$\eta_l^{(o,1)}(t_{fl}) = \lambda_3 (\Gamma_l^{(o,1)} - x_l^{(o,1)}(t_{fl})); \quad (3.32)$$

$$\eta_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl}) = \lambda_4 \left( x_{ijl} - \sum_{\rho=1}^P x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl}) \right); \quad (3.33)$$

$$\eta_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl}) = \lambda_4 \left( g_{jl} - \sum_{\rho=1}^P x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl}) \right); \quad (3.34)$$

$$\eta_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{fl}) = \lambda_5 \left( \Gamma_l^{(o,1)} - x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{fl}) \right); \quad (3.35)$$

$$\eta_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{fl}) = \lambda_6 \left( \Gamma_l^{(o,1)} - x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{fl}) \right). \quad (3.36)$$

Каждая из сопряженных переменных соответствует переменной из основной системы дифференциальных уравнений. Исходя из анализа сопряженной системы дифференциальных уравнений видно, что краевые условия в момент времени  $t = t_{fl}$  равны краевым условиям в момент времени  $t = t_{ol}$ .

### 3.7. Гамильтониан (функция Гамильтона)

В соответствии с принципом максимума Л.С. Понтрягина введем следующую функцию Гамильтона [10]:

$$\begin{aligned} H(\dot{\mathbf{x}}(t), \dot{\eta}(t), \mathbf{u}^*(t), t) = \\ = (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) \rightarrow \max_{\mathbf{u} \in Q} H(\dot{\mathbf{x}}(t), \dot{\eta}(t), \mathbf{u}^*(t)) \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \| \dot{x}_l^{(o,1)}(t), \dot{x}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), \dot{x}_{j\rho l}^{(n,2)}(t), \dot{x}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t), \dot{x}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) \|,$$

$$\dot{\eta}(t) = \| \dot{\eta}_l^{(o,1)}(t), \dot{\eta}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), \dot{\eta}_{j\rho l}^{(n,2)}(t), \dot{\eta}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t), \dot{\eta}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) \|,$$

$$\mathbf{u}(t) = \| u_l^{(o,1)}(t), u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), u_{j\rho l}^{(n,2)}(t), \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \|,$$

$Q$  – область допустимых управлений, определяемая ограничениями (3.6)–(3.15),  $u^*(t)$  – вектор экстремального программного управления компоненты которого представляют собой частные программы управления соответствующими операциями, входящими в состав ИнП, протекающих при взаимодействии ПДО.

Задача максимизации Гамильтониана (3.37) в нашем случае декомпозируется на 4 частные оптимизационные подзадачи (функции Гамильтона) следующего вида:

6.1. Подзадача  $H_1$

$$H_1 = \sum_{i=1}^L \eta_i^{(\alpha,1)}(t) u_i^{(\alpha,1)}(t) \rightarrow \max \quad (3.38)$$

выполняется при ограничениях (3.6) и (3.12).

6.2. Подзадача  $H_2$

$$H_2 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \dot{\eta}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \rightarrow \max \quad (3.39)$$

$j \neq i$

выполняется при ограничениях (3.7) и (3.10).

6.3. Подзадача  $H_3$

$$H_3 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \dot{\eta}_{j\rho l}^{(n,2)}(t) u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \rightarrow \max \quad (3.40)$$

выполняется при ограничениях (3.8) и (3.11).

6.4. Подзадача  $H_4$

$$H_4 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[ \dot{\eta}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \dot{\eta}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) \times \right. \\ \left. \times (\gamma_{j\rho l}(t) + \beta_{j\rho l}(t) \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)) \right] \rightarrow \max \quad (3.41)$$

выполняется при ограничениях (3.9), (3.13) и (3.14).

Максимизация функции Гамильтона  $H_1$  (3.38)

позволяет на формальной основе найти конкретные подынтервалы времени, на которых сохраняется структура взаимосвязей ПДО.

Функция Гамильтона  $H_4$  (3.41) позволяет при решении оптимизационной задачи «о назначениях» определить на каких ПДО какие операции, входящие в состав ИнП должны выполняться в каждый конкретный момент времени. Подзадачу  $H_4$  можно свести к задаче целочисленного линейного программирования (ЦЛП). В результате решения оптимизационной задачи вычисляются управляющие воздействия  $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  и  $\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$ , которые подставляются в модели (3.4) и (3.5) соответственно. Гамильтониан является входом в  $H_2$  и  $H_3$ , и выполняется перед этими подзадачами.

С использованием функции Гамильтона  $H_2$  формируется и решается подзадача планирования (программного управления) процессов приема/передачи данных. При этом в каждый момент времени выполняется максимизация Гамильтониана (3.39) на множестве ограничений (3.7). В итоге

решения данной задачи ЛП определяется с какой интенсивностью (скоростью)  $u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  необходимо принимать/передавать из  $A_i$  ПДО в  $A_j$  данные типа  $\rho$  при ограничении на пропускную способность канала (3.10).

С использованием функции Гамильтона  $H_3$  решается подзадача обработки данных. В каждый момент времени производится максимизация Гамильтониана (3.40) на множестве ограничений (3.8) в следствие чего определяется с какой интенсивностью (скоростью)  $u_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$  необходимо обрабатывать данные типа  $\rho$  в  $A_j$  ПДО при ограничении на пропускную способность ВСР ПДО (3.11), что по сути является оптимизационной задачей ЛП.

Результаты решения задач ЛП, для которых в качестве целевых функций используются функции Гамильтона  $H_2$  и  $H_3$  в каждый момент времени подставляются в модели (3.2) и (3.3) в виде соответствующих программных управлений.

### 3.8. Формулировка задачи программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов

Задачу поиска оптимальной программы управления ИнП можно сформулировать как следующую задачу оптимального управления обобщенной динамической системой вида (3.1)–(3.5). Необходимо перевести указанную обобщенную динамическую систему из заданного начального состояния (3.17) в заданное конечное состояние (3.18)–(3.20) с учетом технических и технологических ограничений (3.6)–(3.15) наилучшим образом с точки зрения показателей качества вида (3.21)–(3.26). Если таких программ управления окажется несколько, необходимо из них выбрать наилучшую предпочтительную с точки зрения обобщенного показателя качества программного управления ( $J_{об}$ ), который является ЦФ:

$$J_{об} = \sum_{k=1}^6 \lambda_k J_k ; \text{ где } \sum_{k=1}^6 \lambda_k = 1; J_k = \frac{J_k}{J_k^*} \quad (3.42)$$

В (3.42)  $k$  – индекс показателя качества;  $J_k$  – нормированное значение показателя качества  $J_k$ ;  $J_k^*$  – наилучшее (максимальное) значение показателя качества  $J_k$ ;  $\lambda_k$  – коэффициент важности показателя качества программного управления.

Рассматриваемая задача оптимального управления относится к задачам неклассического вариационного исчисления и может быть сведена к краевой задаче с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина [11]. Для этого необходимо сформировать Гамильтониан (функция Гамильтона) (3.37) и сопряженную систему дифференциальных уравнений (3.27)–(3.31), которые будут соответствовать основной системе

дифференциальных уравнений, описывающих обобщенную динамическую систему (3.1) – (3.5).

**3.9. Алгоритм поиска программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов**

Алгоритм поиска плана управления ИМП базируется на методе последовательных приближений Крылова-Черноусько [12, 13]). Данный алгоритм включает в себя следующие основные шаги:

**Шаг 1.**  $r = 1$ , где  $r$  – номер итерации. Задается диспетчерский (допустимый) план (программа управления процессами, которая задается ЛПР; в том числе может быть задан нулевой диспетчерский план  $\mathbf{u}_{об}^{(дисп)}(t) \equiv 0$ ). Под диспетчерским планом понимаем допустимый (удовлетворяющий ограничениям) план (программа управления) информационного взаимодействия ПДО на каждом подынтервале постоянства структур.

**Шаг 2.** Подсчитывается значение обобщенного показателя качества  $J_{об}$  по формуле (3.42) для момента времени  $t = t_{0l}$ , т.е. получают значения функционала, которые соответствуют диспетчерскому решению, реализованному на шаге 1. На этом заканчивается итерация с номером  $r = 1$ , и начинается итерация  $r = 2$ .

**Шаг 3.** Рассчитываются условия трансверсальности (3.32)–(3.36), которые переносятся с «правого» конца фазовой траектории движения обобщенной динамической системы вида (3.1)–(3.5) на «левый» конец.

**Шаг 4.** В каждый момент времени, максимизируя функцию Гамильтониан вида (3.37), исходя из ограничений (3.6)–(3.15), осуществляется поиск программного управления, как функции времени,  $\mathbf{u}^{(r)}(t)$  для  $\forall t \in (t_{0l}, t_{fl}]$ . Вычислив Гамильтониан, определяем с какой интенсивностью (скоростью) осуществляется прием/передача данных и с какой интенсивностью (скоростью) осуществляется обработка данных. Вычисляется значение обобщенного показателя качества  $J_{об}$  по формуле (3.42).

**Шаг 5.** В результате выполнения шагов 3-4 в момент времени  $t = t_{fl}$  определяются значения функций:  $\mathbf{x}^{(r)}(t_{fl})$ ,  $\boldsymbol{\eta}^{(r)}(t_{fl})$ , а затем осуществляется проверка условия:

$$|J_{об}^{(r)}(t_{fl}) - J_{об}^{(r-1)}(t_{fl})| < \varepsilon, \quad (3.43)$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность.

Если выполняется условие (3.43), то выполняется выход из цикла, вывод на экран графиков  $\mathbf{x}^{(r)}(t)$ ,  $\mathbf{u}^{(r)}(t)$ ,  $\boldsymbol{\eta}^{(r)}(t)$ ,  $J_k(t)$ ,  $J_{об}(t)$ . Если данное условие не выполняется, то  $r = r + 1$ , переход на шаг 3 и повторение шагов 3-5 данного алгоритма.

Перейдем к описанию вычислительного эксперимента, демонстрирующего взаимодействие СМ и ДМ.

**4. Результаты вычислительного эксперимента**

Для демонстрации преимуществ предложенного полимодельного (статико-динамического) описания процессов приема, передачи, обработки, хранения и потери данных и информации, а также соответствующей обобщенной процедуры планирования при взаимодействии ПДО и его программной реализации был выполнен следующий вычислительный эксперимент. Графическое изображение исходных данных из [14, 15] представлено на рисунке 4.1. Внутри каждой вершины графа размещен номер ПДО, величины максимальной интенсивности (скорости) обработки поступающих данных, (указана в треугольниках, задана в Мб/с) и максимального объема ЗУ (указана внутри квадратов, задана в Мб). На рисунке 4.1 дугам поставлена в соответствие максимальная интенсивность (скорость) передачи данных по каналам связи, равной 10 Мб/с, при этом пунктирная дуга соответствует передаче информации, сплошная – данных.

С помощью СМ задаются варианты структурных состояний для заданных участков постоянства структур группировки ПДО, а также рассчитываются значения показателей качества.

На рисунке 4.2 представлены результаты расчетов для исходных данных с рисунка 4.1 с помощью СМ, где дугам поставлена в соответствие текущая интенсивность (скорость) передачи данных (сплошная) / информации (пунктирная). В треугольниках размещена текущая интенсивность (скорость) обработки поступающих данных в ПДО, в квадратах текущий объем сохраненных данных (числитель) и информации (знаменатель) в ЗУ ПДО на том же рисунке.

Визуализация статического и динамического планов показана на рисунках 4.3 и 4.4 соответственно. Как видно из статического плана КнП передано 23 Мб информации, в ЗУ ПДО сохранено 36,5 Мб данных и 40,5 Мб информации. Потери информации в группировке ПДО составили 210 Мб или 67 %, что связано с ограничениями на каналы связи, ВСр, и объемы ЗУ ПДО в рассматриваемом примере.

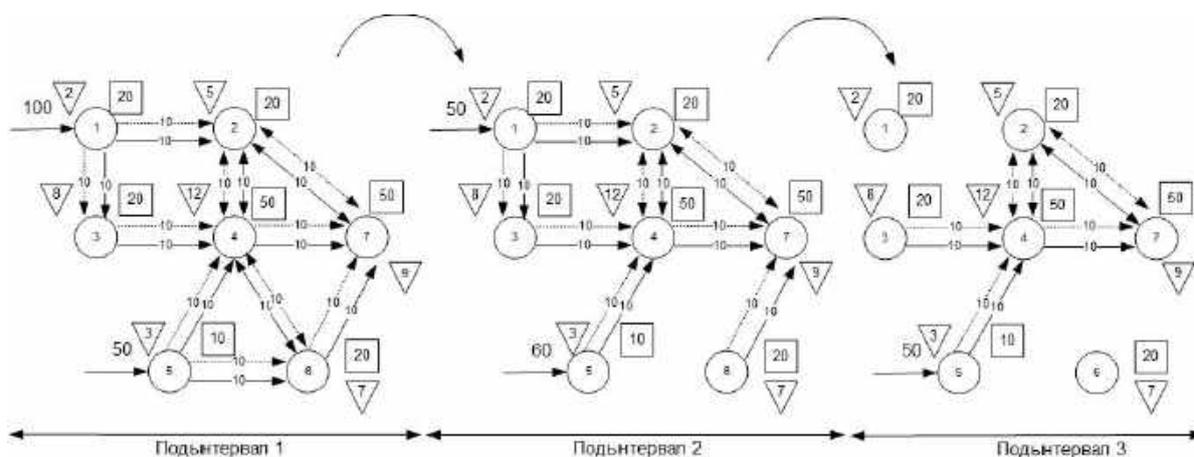


Рис. 4.1. Пример задания исходных данных о группировке ПДО и ее структурной динамике

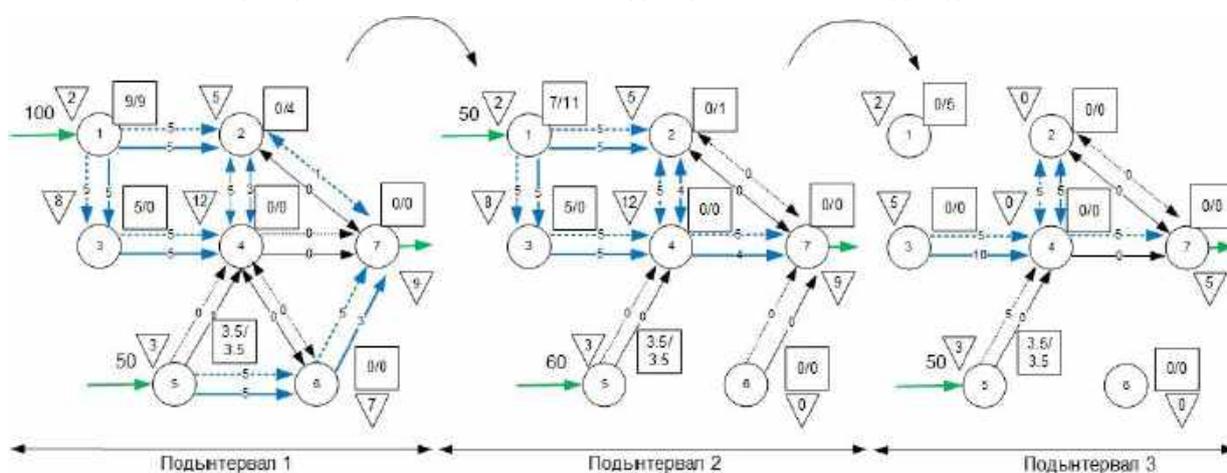


Рис. 4.2. План информационного взаимодействия группировки ПДО

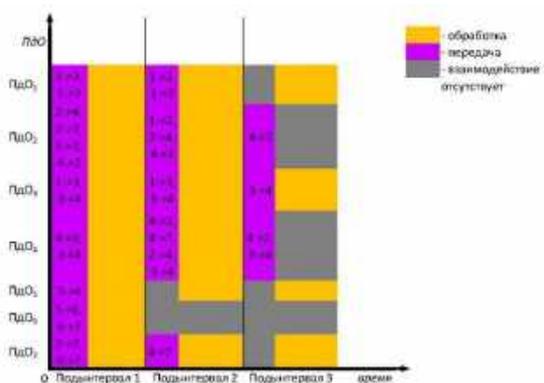


Рис. 4.3. Визуализация плана, полученного с помощью СМ

Как видно из рисунка 4.4, данный план является детализацией агрегированного плана, полученного с применением СМ (рисунок 4.3), но с привязкой ко времени. Из выше изложенного, очевидно, что с помощью ДМ выполняется уточнение плана, полученного с применением СМ.

Данные, показанные на рисунках 4.2-4.4 были получены с применением разработанных и реализованных на программном уровне моделей и алгоритмов с использованием Matlab language [16, 17] и Matlab app designer [16, 17].

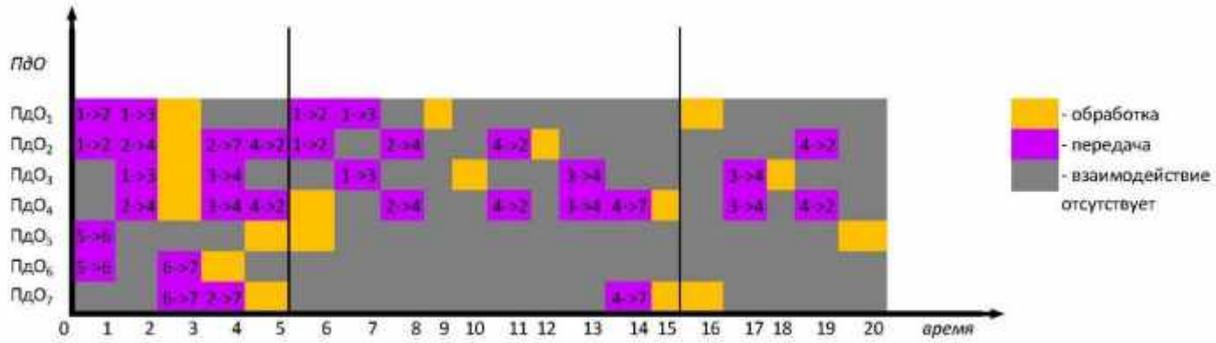


Рис. 4.4. Визуализация плана, полученного с помощью ДМ

### 5. Анализ результатов

Результатом решения задачи планирования с использованием СМ является план в пространстве, а задачи программного управления с использованием ДМ – детализированный статический план с привязкой ко времени.

Проведенный анализ СМ планирования ИнП при взаимодействии ПдО, показывает, что результаты решения задач планирования с использованием СМ зависят от объемов ЗУ ПдО, их производительности, а также пропускной способности каналов связи между ПдО.

Например, из рисунка 4.2 можно установить, что когда появляются подынтервалы постоянства структуры создается функциональная избыточность за счет разнообразия структур, т.е. есть возможность более гибко обходить заполненные ЗУ ПдО. Благодаря чему создается больше возможностей для организации управления. Следовательно, чем больше участков постоянства структуры, тем больше возможности конфигурации или ухода от проблемных ПдО.

Рассмотрим разные сценарии, приведенные на рисунках 4.6, исходные данные для них представлены на рисунке 4.5.

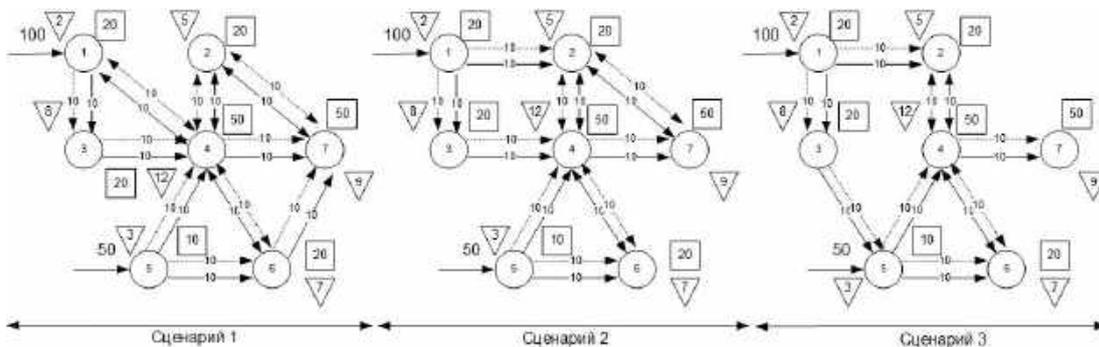


Рис. 4.5. Исходные данные о группировке ПдО и ее структурной динамике для нескольких сценариев

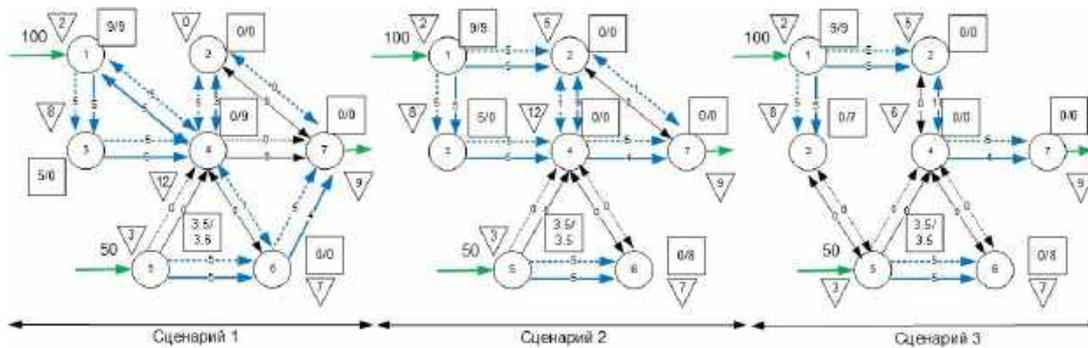


Рис. 4.6. Сценарии структурной динамики группировки ПдО и их информационного взаимодействия

Как видно из статического плана (рисунок 4.6) при сценарии 1 КнП передано 40 Мб информации, в ЗУ ПдО сохранено 12,5 Мб данных и 12,5 Мб информации,  $I_0 = 1,7$ ; при сценарии 2 КнП передано 46 Мб информации, в ЗУ ПдО сохранено 17,5 Мб данных и 20,5 Мб информации  $I_0 = 5,2$ ; при сценарии

3 КнП передано 40 Мб информации, в ЗУ ПдО сохранено 12,5 Мб данных и 27,5 Мб информации  $I_0 = 1,0$ . С точки зрения обобщенного показателя качества планирования ИнП сценарий 2 является наилучшим из представленных на рисунке 4.6.

Из рисунка 4.6 видно, что переменная структура при одинаковых объемах ЗУ ПдО, пропускных способностях ВСр, пропускных способностях каналов связи между ПдО создают разные возможности организации управления ИнП группировки ПдО. Также можно наблюдать, что переменная структура влияет на варианты структуры на каждом подынтервале. А это говорит, о том, что важно решать задачу управления структурой. Необходимо отметить, что в данной статье выполняется управление структурой технологий.

Также выявлено, что наиболее интересные результаты можно получить, варьируя коэффициент, характеризующий степень обработки информации, коэффициенты важности показателей качества, количество подынтервалов постоянства структур и изменяя топологическую структуру группировки ПдО.

Кроме того, на основе разработанных и реализованных на программном уровне СМ и ДМ можно выполнять оценивание и анализ показателей качества программного управления ИнП при взаимодействии ПдО [18].

В дальнейшем возможно выполнить аппроксимацию областей достижимости [19, 20] по возмущениям на основе показателей качества, полученных с помощью предложенных в данной статье моделей.

### Заключение

В статье представлено оригинальное формальное описание и решение задачи программного управления (планирования) ИнП, происходящими при взаимодействии (функционировании) группировки ПдО. Оригинальность подхода состоит в предлагаемой автором системно-управленческой интерпретации исследуемых процессов, позволившей на конструктивном уровне объединить математический аппарат математического программирования и теории оптимального управления при синтезе планов и программ управления ИнП.

Разработано и реализовано на программном уровне полимодельное (статико-динамическое) описание процесса оптимального управления ИнП, включающим в себя процессы приема, передачи, хранения, обработки и потери данных при

взаимодействии ПдО. В состав полимодельного описания вошли взаимосвязанные СМ и ДМ. Они дополняют и усиливают описательные возможности друг друга. Так в СМ планирования ИнП при взаимодействии ПдО достаточно просто учитываются такие аспекты информационного взаимодействия, как процессы потери данных, а также ограничения на пропускные способности каналов, которые в ДМ требуют введения сложных фазовых ограничений. В ДМ в отличие от СМ проводится детальное описание процессов распределения и обработки данных с привязкой к конкретным моментам времени, что затруднительно описать в СМ. Более того, с помощью ДМ можно рассчитать и оптимизировать такие интегральные показатели качества программного управления ИнП как показатели равномерности и неравномерности использования ресурсов ПдО как на всем интервале программного управления, так и в каждый текущий момент времени. Расчет данных показателей в СМ приводит к увеличению ее размерности и необходимости введения нелинейных ограничений [5].

Как показывают эксперименты с разработанным прототипом программного обеспечения, основное достоинство предложенного модельно-алгоритмического обеспечения состоит в том, что за счет полимодельного описания удалось на конструктивном уровне описать разнотипные ограничения, связанные с функционированием современных ПдО с перестраиваемой структурой, учет которых в каждой из отдельных моделей – СМ и ДМ приводит к серьезным математическим и алгоритмическим проблемам.

В целом разработанные модели и алгоритмы программного управления ИнП при взаимодействии ПдО могут быть использованы не только для планирования информационного взаимодействия группировки ПдО, но и организации управления информационными потоками в территориальных неоднородных сетях для повышения оперативности и качества планирования указанных ИнП в интересах обеспечения своевременного и обоснованного принятия решения о состоянии КНО.

### Литература

- 1 Бочарников А.И., Коваленко В.П., Коваленко А.В., Тихонычев В.В., Худяков А.В. Космическая зональная съемка для определения скорости и ускорения подвижных объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8, № 1. С. 48—58. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.48.58.
- 2 Стариченков А.Л., Модин Н.В. Алгоритмы функционирования интеллектуальных систем управления морскими подвижными объектами // Транспорт России: Проблемы и перспективы – 2020 : материалы юбилейной международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 10-11 ноября 2020). СПб.: ИПТ РАН, 2020. С. 121-125.
- 3 Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с. DOI: 10.31857/S9785907036321000001.
- 4 Ушаков В.А. Разработка статической модели управления структурной динамикой автоматизированной системы управления подвижными объектами // XLV Академические чтения по космонавтике. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. Т. 3. С. 55-57.
- 5 Москвин Б.В., Михайлов Е.П., Павлов А.Н., Соколов Б.В. Комбинированные модели управления структурной динамикой информационных систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 7-11.
- 6 Москвин Б.В. Оптимизация передачи данных в вычислительной сети с коммутацией пакетов // Труды 5-ой Всесоюзной конференции «КОМПАК-87». Рига, 1987. С. 168–171.

- 7 Ушаков В.А. Разработка динамической модели управления структурной динамикой автоматизированной системы управления подвижными объектами // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2020): материалы конференции (Санкт-Петербург, 7-8 октября 2020). СПб.: АО "Концерн "ЦНИИ "Электрон", 2020. С. 306-308.
- 8 Захаров В. В. Программно-математическое обеспечение процесса модернизации сложных объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 975-984. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-975-984.
- 9 Захаров В.В. Динамическая интерпретация формального описания и решения задачи модернизации сложных объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 10. С. 914—920. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-914-920.
- 10 Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1968. 408 с.
- 11 Понрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. 4-е изд. М.: Наука, 1983. 392 с.
- 12 Крылов И.А., Черноусько Ф.Л., Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1972. Т. 12, № 1. С. 14—34.
- 13 Семашкин В.Е. Максимизация дальности управляемого полета с использованием метода Крылова-Черноусько // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019) : материалы конференции (Москва, 17-20 июня 2019 г.). М.: ИПУ РАН, 2019. С. 1267-1271. DOI: 10.25728/vspu.2019.1267.
- 14 Павлов Д.А. Методика планирования операций информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2015. № 649. С. 37-47.
- 15 Мануйлов Ю.С., Павлов А.Н., Осипенко С.А., Павлов Д.А. Сравнительный анализ результатов планирования комплекса операций информационного взаимодействия сложных объектов в динамически изменяющихся условиях // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2015. № 647. С. 30-36.
- 16 MATLAB Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html> (дата обращения: 27.04.2022)
- 17 Чен К., Джиблин П., Ирвинг А. Matlab в математических исследованиях: пер. с англ. В.Е. Кондрашова и С.Б. Королева. М.: Мир, 2001. 346 с.
- 18 Ушаков В.А. Модельно-алгоритмическое обеспечение оперативного оценивания и анализа показателей качества управления информационными процессами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 8. С. 688—692. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-688-692
- 19 Sokolov B., Ushakov V. Model-algorithmic Support for Abilities Calculating of Control System Based on Projection Operators // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 986. P. 342-348. DOI:10.1007/978-3-030-19813-8\_35.
- 20 Ушаков В.А. Области достижимости и проектирующие операторы в задачах оптимального управления // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019) : материалы конференции (Москва, 17-20 июня 2019 г.). М.: ИПУ РАН, 2019. С. 1037-1042. DOI: 10.25728/vspu.2019.1037.

#### References

- 1 Bocharnikov A.I., Kovalenko V.P., Kovalenko A.V., Khudyakov A.V. Kosmicheskaya zonal'naya s'emka dlya opredeleniya skorosti i uskoreniya podvizhnykh ob'ektov [Space Zonal Survey to Determine the Speed and Acceleration of Moving Objects], Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy. 2021. Т. 8, № 1. С. 48—58. doi: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.48.58.
- 2 Starichenkov A.L., Modin N.V. Algoritmy funktsionirovaniya intellektual'nykh sistem upravleniya morskimi podvizhnymi ob'ektami [Algorithms for the functioning of intelligent control systems for marine mobile objects], Transport Rossii: Problemy i perspektivy – 2020 : materialy yubileyroy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Sankt-Peterburg, 10-11 noyabrya 2020). SPb.: IPT RAN, 2020. S. 121-125.
- 3 Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov [Qualimetry of models and polymodel complexes]. М.: RAN, 2018. 314 s. doi: 10.31857/S9785907036321000001.
- 4 Ushakov V.A. Razrabotka staticheskoy modeli upravleniya strukturnoy dinamiko avtomatizirovannoy sistemy upravleniya podvizhnymi ob'ektami [Development a static model for controlling the structural dynamics of an automated control system for moving objects], XLV Akademicheskie chteniya po kosmonavtike. М.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2021. Т. 3. S. 55-57.
- 5 Moskvina B.V., Mikhailov E.P., Pavlov A.N., Sokolov B.V. Combined Models of Structural Dynamics Control of Complex Technical Objects, Journal of Instrument Engineering. 2006. Vol. 49, N 11. P. 7-11. (in Russian).
- 6 Moskvina B.V. Optimizatsiya peredachi dannykh v vychislitel'noy seti s kommutatsiyey paketov [Optimization of data transmission in a computer network with packet switching], Trudy 5-oy Vsesoyuznoy konferentsii «KOMPAK-87». Riga, 1987. S.168—171.
- 7 Ushakov V.A. Razrabotka dinamicheskoy modeli upravleniya strukturnoy dinamiko avtomatizirovannoy sistemy upravleniya podvizhnymi ob'ektami [Development of a dynamic model for managing the structural dynamics of an automated control system for moving objects], Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2020): materialy konferentsii (Sankt-Peterburg, 7-8 oktyabrya 2020). SPb.: АО "Koncern "TsNII "Elektropribor", 2020. S. 306-308.
- 8 Zakharov V.V. Software and mathematical support for complex objects modernization. Journal of Instrument Engineering. 2020. Vol. 63, N 11. P. 975—984 (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-975-984

- 9 Zakharov V.V. Dynamic interpretation of formal description and solution of the problem of complex object modernization, *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol 62, N 10. P. 914—920. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-914-920.
- 10 Boltyanskiy V.G. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya [Mathematical methods of optimal control]*. M.: Nauka, 1968. 408 s.
- 11 Pontryagin L.S., Boltayanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *The mathematical theory of optimal processes*, Wiley, 1962.
- 12 Krylov I.A., Chernous'ko F.L. An algorithm for the method of successive approximations in optimal control problems, *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1972. Vol. 12, N 1. P. 15-38. doi: 10.1016/0041-5553(72)90063-8.
- 13 Semashkin V.E. Maksimizatsiya dal'nosti upravlyaemogo poleta s ispol'zovaniem metoda Krylova-Chernous'ko [Maximization of the controlled flight range using the Krylov-Chernousko method], XIII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya (VSPU-2019) : materialy konferentsii (Moskva, 17-20 iyunya 2019). M.: IPU RAN, 2019. S. 1267-1271. doi: 10.25728/vspu.2019.1267.
- 14 Pavlov D.A. Methodology for planning operations of information interaction of a cluster of small spacecraft for remote sensing of the earth, *Proceedings of the A.F. Mozhaisky*. 2015. Vol. 649. P. 37-47. (in Russian)
- 15 Manuilov Yu.S., Pavlov A.N., Osipenko S.A., Pavlov D.A. Comparative analysis of the results of planning a complex of operations of information interaction of complex objects in dynamically changing conditions, *Proceedings of the A.F. Mozhaisky*. 2015. Vol. 647. P. 30-36. (in Russian)
- 16 MATLAB Documentation <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>
- 17 Chen K., GIBLIN P.J., Irving A. *Mathematical Explorations with MATLAB*, Cambridge University Press, 1999. doi: 10.1017/cbo9780511624117.
- 18 Ushakov V.A. Model-algorithmic support for operational assessment and analysis of quality indicators of control over information processes. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 8. P. 688—692 (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-688-692
- 19 Sokolov B., Ushakov V. Model-algorithmic Support for Abilities Calculating of Control System Based on Projection Operators, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 986. P. 342-348. doi: 10.1007/978-3-030-19813-8\_35
- 20 Ushakov V.A. Oblasti dostizhimosti i proektiruyushchie operatory v zadachakh optimal'nogo upravleniya [Reachability areas and projecting operators in optimal control tasks], XIII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya (VSPU-2019) : materialy konferentsii (Moskva, 17-20 iyunya 2019). M.: IPU RAN, 2019. S. 1037-1042. DOI: 10.25728/vspu.2019.1037.

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

**Виталий Анатольевич Ушаков**, соискатель ученой степени кандидата технических наук лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, старший преподаватель кафедры информационно-сетевых технологий, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А, e-mail: mr.vitaly.ushakov@yandex.ru

**Vitaly A. Ushakov**, Applicant for the degree of candidate of technical sciences at the Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14<sup>th</sup> line V.I., St. Petersburg, 199178, Russian Federation, Senior Lecturer at the Department of information and network technologies, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, Bolshaya Morskaya str., St. Petersburg, 190000, Russian Federation, e-mail: mr.vitaly.ushakov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 03.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.08.2022.

**Научная статья**

УДК 338.47: 341.24: 625.1: 627.21: 656

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.032>

## Механизмы регулирования и согласованного планирования китайского трафика в порты Западной Европы

П.П. Бобрик<sup>1</sup> Bobrikpp@mail.ru, Н.В. Шаталова<sup>1</sup> shatillen@mail.ru, В.В. Вислогузов<sup>1</sup> smailik0670@gmail.com

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

**Аннотация.** Статья посвящена оценке последствий сильного роста цен на морской фрахт из Китая с момента ковидных событий во всем мире. В качестве основной долгосрочной причины роста называется общемировая инфляция. Среди временных локальных факторов отмечаются ковидные ограничения и недостаточное число судов из-за низких цен фрахта в предыдущие годы. Анализируется относительно стабильная рыночная ситуация до 2020 года. Она характеризовалась долей морских перевозок на направлении Китай - Западная Европа свыше 90%, и в два-три раза более дорогими железнодорожными тарифами. За последние пару лет в результате опережающего роста фрахта стоимость доставки морем и по суше стала соизмеримой. Это создало предпосылки для значительного передела рынка в пользу железной дороги. Предложен прогноз эволюционного сценария, предполагающий возвращение ситуации на направлении Китай - Западная Европа к доковидным пропорциям в ближайшие годы. Также рассмотрен вариант запуска по направлению транзитного железнодорожного коридора. В этом случае снижение потока китайских грузов в порты Западной Европы может достигнуть величины до 7 млн TEU в год.

**Ключевые слова:** Великий шелковый путь, конкуренция видов транспорта, рост стоимости фрахта, транспортный коридор, математическая модель, экономика транспорта.

**Для цитирования:** Бобрик П.П., Шаталова Н.В., Вислогузов В.В. Механизмы регулирования и согласованного планирования китайского трафика в порты Западной Европы, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 248—255.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.032>

## Regulatory and Planning Arrangements in Chinese traffic to Western European ports

Petr P. Bobrik<sup>1</sup> Bobrikpp@mail.ru, Natalia V. Shatalova<sup>1</sup> shatillen@mail.ru,  
Victor V. Visloguzov<sup>1</sup> smailik0670@gmail.com

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science

**Abstract.** The article is devoted to the assessment of the consequences of a strong increase in prices for sea freight from China since the covid events around the world. Global inflation is cited as the main long-term cause of growth. Among the temporary local factors, covid restrictions and an insufficient number of vessels are noted due to low freight prices in previous years. The relatively stable market situation until 2020 is analyzed. It was characterized by the share of sea transportation on the China -Western Europe route over 90%, and two to three times more expensive rail tariffs. Over the past couple of years, as a result of the outstripping growth of freight, the cost of shipping by sea and by overland has become comparable. This created the prerequisites for a significant redistribution of the market in favor of the railway. A forecast of an evolutionary scenario is made, suggesting a return of the situation in the China-Western Europe direction to pre covid proportions in the coming years. The option of launching a transit railway corridor is also being considered. In this case, the decrease in the flow of Chinese cargo to the ports of Western Europe can reach up to 7 million TEU per year.

**Keywords:** The Great Silk Road, types of transport competition, freight costs growth, transport corridor, mathematical model, economy of transport.

**For citation:** Petr P. Bobrik, Natalia V. Shatalova, Victor V. Visloguzov Regulatory and Planning Arrangements in Chinese traffic to Western European ports, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 248—255.

### Введение

События последних нескольких лет привели к значительным изменениям во многих областях жизни общества. Не стал исключением и транспорт. Ковидные локдауны привели к массовым и принципиальным трансформациям логистических цепочек по всему миру. Остановки работы портов на длительное время и карантин на поставки грузов спровоцировали длительные перебои в транспортном сообщении в одних местах и крупным пробкам в других. Среди наиболее значимых

нарушений можно отметить остановки работы китайских портов и проблемы с пустыми контейнерами на западном побережье США.

Классическое соотношение спроса и предложения, которое работает также и на транспорте, в этих экстраординарных условиях неизбежно начало деформировать цены, пытаясь адаптировать их к новым условиям. На это наложились общие процессы в мировой экономике. Прежде всего падение покупательной способности доллара и других резервных валют. Наиболее явно это отразилось в росте цен на энергоносители,

который не наблюдался с 70-ых годов прошлого столетия.

В ответ на это транспортные тарифы также начали стремительный рост. Прежде всего это

касается главного в мире транспорта - морского. Контейнерный фрахт всего за пару лет вырос в разы (рис. 1), [1, 2, 3].

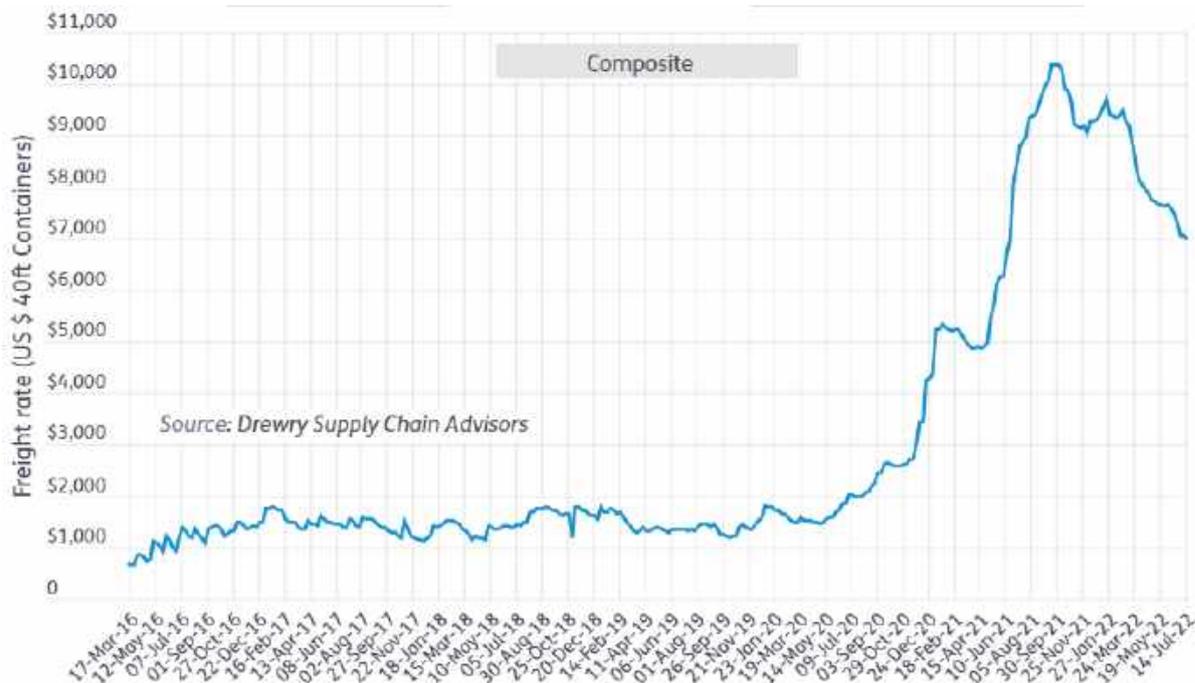


Рис. 1. Drewry's composite World Container Index

Если выбрать за среднюю цену перед ростом в относительно стабильном периоде 2016-2019 годов около 1500\$ за 40 футовый контейнер, то в моменте стоимость фрахта поднималась более чем в семь раз. И хотя в дальнейшем цены откорректировались вниз и продолжают снижаться, но все равно такие изменения были невиданными в последние десятилетия.

Любой рост цен действует угнетающе на деловую активность, тем более такой значительный. Однако, в случае морских перевозок дополнительным негативным фактором стало конкурентное давление со стороны железнодорожных тарифов, которые выросли в меньшей степени.

Рынок морских перевозок относительно дерегулирован с большим числом мелких участников. Законы свободного ценообразования здесь применимы в большей мере, вплоть до биржевых законов. Что и предопределило столь сильный и стремительный отклик на мировые процессы. Напротив, железнодорожный транспорт намного более монополизирован, нередко на страновом уровне. Его тарифы пристально наблюдаются государственными органами с целью недопущения раскрутки инфляции. В результате рост цен на сухопутных перевозках в целом за последние пару лет заметно отставал от морских.

В результате для мировой экономики в целом сухопутное направление стало более привлекательным, чем было ранее. На ряде железнодорожных направлений наблюдался сильный рост трафика из-за частичной переориентации контейнерных перевозок с традиционных маршрутов.

Особенно сильно подобные процессы проявились на направлении Восточный Китай -

Западная Европа. На нем дополнительно сказался фактор антироссийских санкций со стороны США и Европы, которые привели к обрыву многих внешнеэкономических связей. После ухода с российского рынка множества европейских компаний, на уровне государства были озвучены цели переориентации деловой активности на Восток. Поиск новых коридоров доставки грузов был озвучен в России на самом высоком уровне. В результате уже в первые месяцы после начала украинских событий стали фиксировать значительный рост контейнерных поездов из Китая.

В связи с такими тенденциями возникают естественные вопросы. Насколько долго продлится этот рост, до какого объема могут пойти перевозки, какой будет равновесная цена на этом направлении? Являются ли такие поезда устойчивыми в долгосрочном плане или они перестанут быть необходимыми, если вернется возможность доставки морем?

Перенос китайских перевозок с моря на сушу может привести к падению оборота портов на балтийском море со всем вытекающими последствиями. В статье делаются попытки количественно оценить масштаб этих изменений. А также их сроки и перспективы.

#### Доковидная ситуация

Интенсивные попытки возродить Великий шелковый путь как альтернативу морским сообщениям активно начали делать еще до 10-ых годов. Особенно сильный толчок они получили в 2013 году после объявления китайской инициативы "Один пояс - один путь" [4, 5]. Различные проекты разрабатывали крупнейшие китайские банки,

международные финансовые организации вроде МВФ или всемирного банка, структуры ЕАЭС, Казахстана. И отдельные ведущие мировые экономисты. Но пока существенного прогресса в этих исследования не достигнуто [6].

Все разработки разбивались прежде всего о существенный разрыв между морскими и железнодорожными тарифами на этом направлении.

Поскольку сейчас ситуация быстро меняется, то для иллюстрации этого тезиса наиболее верным будет воспользоваться относительно стабильными ценами доковидных событий, т.е. до 2020 года. Стоимость фрахта из Шанхая до Роттердама в это время колебалась в диапазоне 1500-2000 долларов за 40 футовый контейнер (рис. 2), [1].



Рис. 2 Drewry World Container Index Shanghai - Rotterdam

Справедливости ради надо отметить, что цены на фрахт в это время были депрессивные, близкие к себестоимости. В результате глобальный портфель заказов на строительство контейнеровозов в 2020 году упал до самого низкого уровня с 2007. По данным аналитического агентства Alphaliner за июль 2019, отношение заказов на строительство новых судов к мировому флоту составило всего 9,4%, или 2,21 млн TEU [7]. Поэтому отскок цен от низов помимо общей ситуации в мире был необходим также и по чисто внутренним причинам для начала обновления флота.

Аналогичная перевозка по железной дороге в этот же период цен стоила около 6000-6500 долларов, т.е. почти в три раза больше. В этой сумме потребители не видели китайских дотаций, с учетом которых доставка подсказывала по некоторым оценкам до 10 тыс. долларов [8].

При таком ценовом дифференциале было не удивительным, что почти весь трафик из Китая в Европу шел морем. В доковидные времена общий поток колебался в диапазоне 12-14 млн. TEU в год. [8]. Из них по суше доставлялось всего несколько сотен тысяч. Т.е. несколько процентов от общего трафика.

Нельзя сказать, что многочисленные усилия по раскрутке железнодорожного коридора с 2013 года ничего не дали. Различные меры вроде расшивке узких мест или сглаживания таможенных проблем, безусловно были полезными и даже необходимыми. Сухопутный трафик уверенно рос все эти годы.

Причем рост составлял сотни процентов. Однако в абсолютном выражении он так и не смог превысить миллион контейнеров в год, т.е. остался ниже 10% уровня от общего потока. Другими словами, большие проценты были порождены малыми цифрами.

Очень много было надежд на скорость доставки, которая морем была в несколько раз больше и составляла около 30-40 дней в трассировке через Суэцкий канал. Железная дорога справлялась с этим за пару недель. Однако, как показала практика, фактор скорости имел значение только для малого объема грузов, преимущественно дорогих и / или требующей срочной доставки.

#### Период 2019-2022

Целью нашей статьи является оценка перспектив и степени перетока перевозок по направлению Китай - Западная Европа с морского транспорта на железнодорожный.

Поскольку с 2019 года изменилась сама экономика, то значительно трансформировалась структура потребности в перевозках, как по направлениям, так и по объемам. Особенно большие изменения произошли по тарифам.

Последнее в меньшей степени обусловлено внутренними транспортными факторами и в первую очередь является следствием общей ситуации в мировых финансах. Обесценение доллара и других резервных валют приводит к росту стоимости большинства товаров и услуг в номинальном выражении. Оценка, насколько долго продолжится

эта монетарная тенденция, и как сильно могут расти цены, выходит за пределы данной статьи. Поэтому воспользуемся текущими прогнозами от ведущих мировых финансовых институтов и Центробанков, которые обещают продолжение подъема ставок и раскрутки инфляции в ближайшие годы. А раз так, то и рост транспортных тарифов скорее всего также продолжится.

Сухопутные тарифы намного более инерционны. Но и они тоже постепенно дорожают. Однако темпы роста несоизмеримо ниже. К сожалению, на железнодорожном транспорте нет широко распространенных бенчмарков, таких как Baltic Dry Index или World Container Index. Ситуация меняется на страновом уровне, и даже на уровне отдельных перевозчиков. В качестве одного из индикаторов можно предложить композитный индекс ERAI [9, 10], который дает представление о ценовой динамике для части маршрута из Китая в Европу от Казахского Дюстыка на границе с Китаем до западной границы Белоруссии. Также этот индекс не учитывает перевозки по другим трассировкам направления Восток - Запад. Тем не менее, для качественной оценки ситуации он достаточен. На 15/08/2022 года рост индекса за три последние года всего составил всего +9,92% [9, 11]. Что в сравнении с трехзначными числами процентов роста морских тарифов не сравнимо.

На время написания статьи сложилась ситуация, когда морские перевозки в данном направлении стали как минимум не дешевле. Это дало новый толчок переходу морских перевозок на сухопутные. Однако, ожидать, что такая ситуация будет устойчивой во времени неправильно. Как и полагается по законам биржевого ценообразования, любое движение должно перескочить за разумные границы, прежде чем начнется откат и далее консолидация с асимптотикой на справедливых уровнях. В росте тарифов из китайских портов также большую роль различные временные факторы, прежде всего ковидные локдауны, которые к тому же не являются транспортными.

То, что текущие цены на фрахт из Китая являются завышенными, дополнительно подтверждается тем, что стоимость доставки на обратном маршруте из Роттердама в Шанхай в настоящее время составляет всего около 1250 долларов, т.е. в несколько раз ниже. Впрочем, такое расхождение наблюдалось всегда и в некотором смысле является нормальным.

В настоящее время морские тарифы продолжают уверенное снижение, и пока не видно признаков останова. Поскольку, львиная доля роста тарифов в 2020-2021 годах происходила из-за инфляционных причин, то из общих соображений соотношение морских и железнодорожных тарифов должно со временем приблизиться к тем, которые наблюдались в доковидные времена. Ведь все затраты при инфляции растут приблизительно с одной скоростью. А раз так, то перекося перевозок по данному направлению в пользу моря должен вернуться приблизительно к доковидным значениям.

Подобные рассуждения на качественном уровне показывают, что на горизонте в несколько лет переработка грузов из Китая в западных портах в целом не должна сильно меняться. Но это только, если не произойдет что-то кардинально новое, вроде организации полноценного транспортного

сухопутного коридора. В этом случае при составлении прогнозов нельзя будет опираться на доковидную прошлую статистику. Одним из выходов из положения может стать математическое моделирование. Причем основанное не на денежном выражении, а на эконометрических зависимостях в физических величинах.

### Затраты энергии

Как говорилось ранее, добиться существенного перевода трафика с морских маршрутов на сухопутные невозможно без значительного снижения железнодорожных тарифов до конкурентных уровней. Например, при равенстве цен на морскую и сухопутную доставку можно ожидать разделение поровну общего трафика. А это около 7 млн. TEU в год против нескольких сотен тысяч в настоящее время.

Если посмотреть структуру затрат в морском фрахте, то львиную долю в нем занимают расходы на топливо. Так в современных сверхкрупных контейнеровозах с грузоподъемностью свыше полумиллиона тонн они могут достигать до 80%. Поэтому необходимым условием, чтобы на том или ином направлении в принципе можно было бы уравнивать морские и железнодорожные тарифы, является требование равенства затрат энергии для обоих типов транспорта, но для направления Китай - Западная Европа условие выполняется. В работах Б.В. Дроздова было рассмотрено несколько трассировок и показано, что затраты энергии приблизительно равны (табл. 1).

Равенство затрат энергии для обоих видов транспорта является необходимым условием, но не достаточным для уравнивания тарифов. Требуется также чтобы прочие расходы не были бы значительными. С последним обычно возникают вопросы.

Для железной дороги доля энергии в железнодорожном тарифе существенно меньше. На отдельных участках она может составлять всего пару десятков процентов. Поэтому для того чтобы реально конкурировать с морским транспортом, прочие расходы при перевозке по суше необходимо принципиально урезать.

Столь высокая эффективность морских перевозок во многом обуславливается эффектом масштаба. Современные контейнеровозы с грузоподъемностью свыше полумиллиона тонн как бы размазывают все прочие затраты на большое число контейнеров.

Так небольшие суда имеют значительно большие доли прочих расходов. Типичный железнодорожный состав также имеет всего 60 вагонов общей грузоподъемностью около 3600 тонн. Поэтому первое, что надо сделать для повышения эффективности сухопутных перевозок, это резко нарастить интенсивность потоков. Тогда значительные капитальные расходы на содержание путевого хозяйства также размажутся по большому числу составов.

Решение как-то сделать является классическим и известно давно. Для этого требуется создать специальный коридор транзитного типа со специальным регулированием со стороны стран транзитеров. Подробности изложены в [12, 13, 14].

Таблица 1

Характеристики коридоров Источник. Работы Б.В. Дроздова [10,11], расчеты автора [12]

Перевозка	Длина (км.)	Время доставки (суток)	Затраты энергии (мДж/т)	Стоимость энергии (\$/контейнер)
Железнодорожная Китай-Финляндия.	10,000	7 -12	1100	458
Морская Китай - Финляндия.	21,000	28	1140	475
Железнодорожная Южная Корея - Зап. Европа	11,000	14	1210	504
Морской Южная Корея - Зап. Европа	22,000	30	1195	498
Железнодорожный Китай - Зап. Европа	11,000	15	1210	504
Морской Шанхай - Амстердам	23,000	27-46	1249	520

**Моделирование**

Пока такого коридора со специальными условиями его регулирования не существует. Поэтому для оценок его рентабельности мы не можем взять реальные цифры из уже существующих проектов. Единственным способом для оценки финансовых результатов работы такого коридора является математическое моделирование. Для этой цели была создана простейшая математическая модель [14]. В ней предполагалась следующая группировка основных типов затрат.

$$Z = E + R + L + C + S ,$$

где *E* (Energy) – затраты на энергию для перевозок, *R* (Road) – расходы на поддержание и эксплуатацию

путей, *L* (Locomotive) – расходы на тягу, *C* (Carriage) – вагоны, *S* (Salary) – оплата труда.

Для коридора не предполагается уплаты никаких внутренних налогов и пошлин, поэтому в списке затрат они не присутствуют. Это можно рассматривать как скрытую дотацию в рамках существующих экономических реалий, но при этом не предполагается явное выделение денежных средств. Другим словами коридор предполагается некоммерческий, но безубыточный.

Для оценки каждой из составляющих затрат была использована отдельная методика. В них использовались эконометрические соотношения различных показателей в зависимости от интенсивности трафика и протяженности маршрута. Это позволило проводить вычисления при разных входящих параметрах. В частности, в зависимости от трафика (рис. 3).

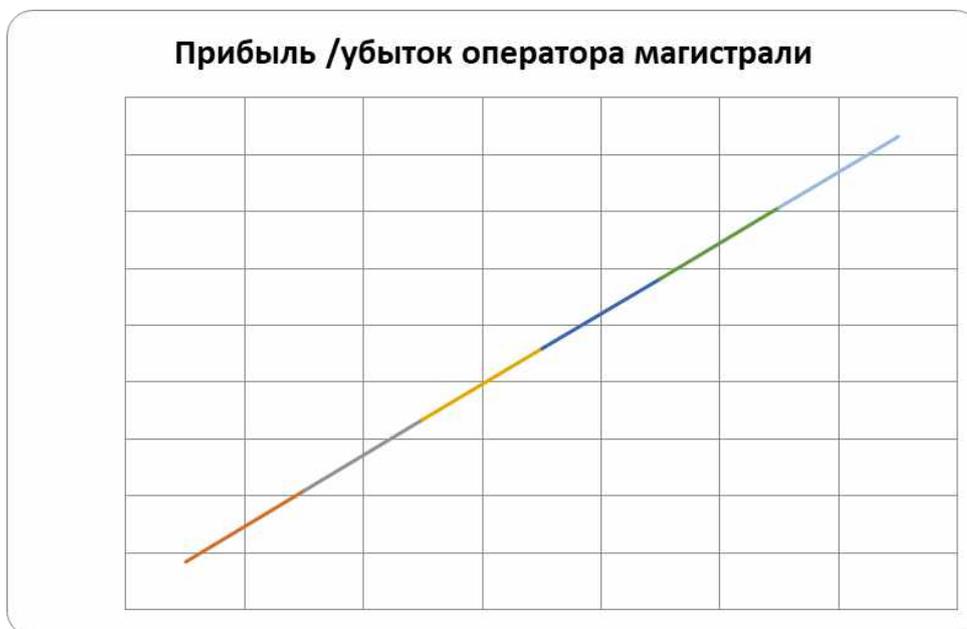


Рис. 3. Финансовый результат коридора (млн. долларов) в зависимости от величины суммарного трафика по направлению Китай - Европа (млн. TEU) при условии равенства тарифов морской и сухопутной доставок. Результаты математического моделирования

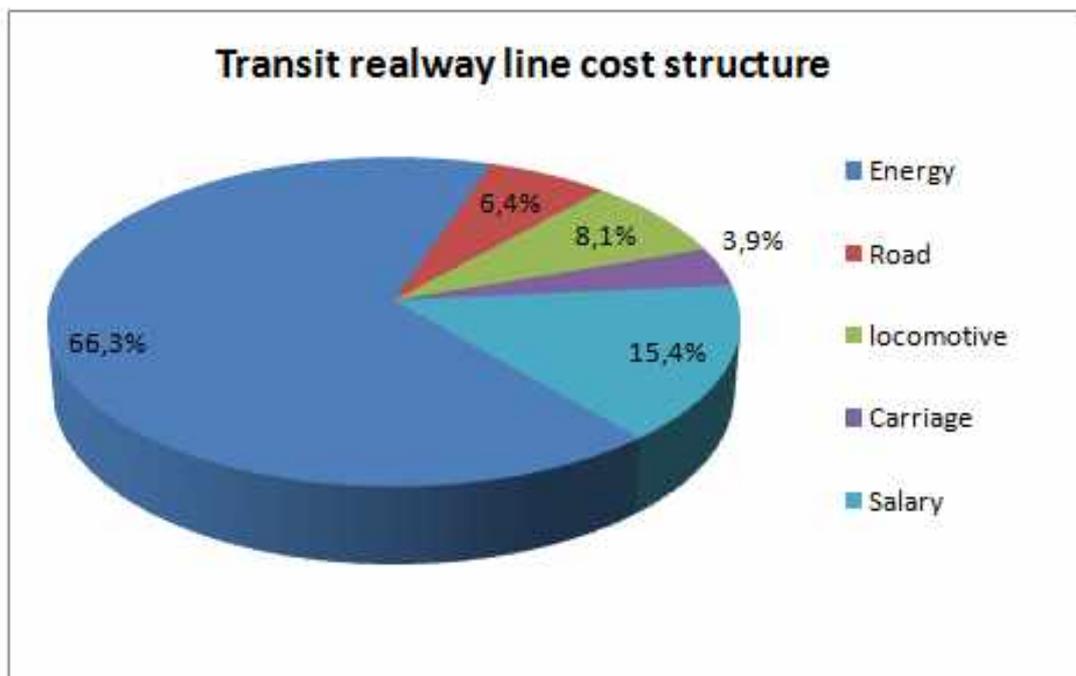


Рис. 4. Модельная структура затрат оператора транзитных перевозок вдоль ВШП при трафике 6-7 млн. TEU

Еще раз подчеркнем, что указанные на рисунке финансовые результаты нельзя достичь в текущей ситуации, поскольку они возможны лишь в условиях полноценного транспортного коридора с низкими тарифами на перевозку, которого пока нет.

Как видно из графика, при невысоких значениях трафика финансовый результат коридора отрицательный, т.е. расходы превышают доходы. Именно по этой причине многолетние попытки уважаемых международных организаций и отдельных экономистов возродить Шелковый путь не привели к значимым результатам. Пока элементарно не хватает интенсивности потока.

Однако, если текущий трафик из Китая в Европу разделить поровну между сухопутным и морским направлением, что можно ожидать при равенстве тарифов, то коридор даже начинает приносить прибыль порядка нескольких миллиардов долларов. Эти пока чисто теоретические положительные результаты позволяют надеяться, что при практической реализации проект также останется рентабельным.

При таких значениях трафика структура затрат приобретает вид как на рисунке 3.

Доля энергии поднялась почти до двух третей от общих расходов, что значительно выше обычных значений на железной дороге. С другой стороны, это ниже лучших значений для самых больших контейнеровозов под 80%.

Но при сухопутных перевозках есть дополнительные расходы на сам железнодорожный путь и его обслуживание. Прежде всего, это расходы на амортизацию. При морских перевозках подобных типов расходов нет, поскольку пользование морем бесплатно, кроме отдельных узких каналов и проливов, а также портов. Данное различие принципиально неустраимо на уровне физических явлений и поэтому всегда будет приводить к более

высоким себестоимостям железнодорожных перевозок.

#### Заключение

С 2019 года мировой фрахт подорожал в разы. На направления Великого шелкового пути рост в моменте составлял более 7 раз [15,16].

Основным фактором роста стоимости фрахта является общее инфляционное давление в мире, обусловленное снижением покупательной силы доллара. Временными факторами были ковидные локдауны, ограничения на коммуникации. А также недостаточное количество судов на рынке из-за низких цен в предшествующие годы.

В настоящее время идет коррекционное снижение стоимости фрахта, но пока цены еще не стали стабильными.

Железнодорожные тарифы выросли в значительно меньшей степени, что повышает привлекательность сухопутных маршрутов.

При эволюционном сценарии развития, через несколько лет можно ожидать возврат к доковидным соотношениям морских и железнодорожных тарифов. А также прежнее соотношение морского и железнодорожного трафика.

Вдоль направления Китай - Западная Европа расходы энергии приблизительно равны для морского и железнодорожного транспортов.

Вдоль направления Китай - Западная Европа возможно существование сухопутного транспортного коридора на условиях самокупаемости и с тарифами, конкурентными по цене с морскими.

В случае создания коридора можно ожидать восстановление Великого Шелкового пути с долей до 50% от общего трафика в направлении.

В случае создания коридора перевалка китайских грузов в портах Западной Европы может упасть на величину до -7 млн. TEU в год.

## Литература

1. Индексы контейнерных перевозок. [Электронный ресурс]. – URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/indeksy-konteinernykh-perevozok-chem-oni-polezny-dlia-investorov> (дата обращения: 15.08.2022).
2. Малыгин И.Г., Макоско А.А. и др. Инфраструктура Сибири, Дальнего Востока и Арктики. Состояние и три этапа развития до 2050 года. – М.: ИПТ РАН, 2019. – 465 с.
3. Бородина О.В., Шаталова Н.В. Подготовка предложений по построению КТС с элементами интеллектуальной транспортной инфраструктуры и когнитивной транспортной безопасности // Технологии построения когнитивных транспортных систем // Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2021. С. 46-50.
4. Один пояс и один путь. - [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B4%D0%B8%D0%BD\\_%D0%BF%D0%BE%D1%8F%D1%81\\_%D0%B8\\_%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD\\_%D0%BF%D1%83%D1%82%D1%8C](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B4%D0%B8%D0%BD_%D0%BF%D0%BE%D1%8F%D1%81_%D0%B8_%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD_%D0%BF%D1%83%D1%82%D1%8C) (дата обращения: 25.07.2022).
5. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Колесников М.В., Королев О.А. Современные проблемы построения сложных когнитивных транспортных систем // В сборнике: XIV всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021. Материалы XIV мультиконференции в 4 томах. Ростов-на-Дону - Таганрог, 2021. С. 156-158.
6. The Silk Road Renaissance and New Potential of the Russian-Chinese Partnership / Podberezkin A., Podberezkina O. // China Quarterly of International Strategic Studies / Volume 01, Issue 02, July 2015.
7. Стоимость морских перевозок достигла пятилетнего максимума. - [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/08/01/880372-stoimost-perevozok>. (дата обращения: 15.08.2022).
8. Транспортные коридоры Шелкового пути: потенциал роста грузопотоков через ЕАЭС. — СПб.: ЦИИ ЕАБР, 2018. — 74 с.
9. Индексы ERAI, котировки. - [Электронный ресурс]. – URL: <http://index1520.com/index/quotes/>. (дата обращения: 15.08.2022).
10. Дроздов Б.В. Направления разработки физической экономики (применительно к транспортному комплексу). // Электронное научное издание «Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление». 2014. Т. 10, № 2 (23). С. 8-94. [Электронный ресурс]. – URL: [www.gypravlenie.ru/?p=2022&lang=en](http://www.gypravlenie.ru/?p=2022&lang=en) (дата обращения: 15.08.2022).
11. Дроздов Б.В. Новый шелковый путь и транзитный потенциал России. // Научно-образовательный сайт Rema. [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.rema44.ru/seminar/papers/2015/drozdv\\_shp.doc](http://www.rema44.ru/seminar/papers/2015/drozdv_shp.doc) (дата обращения: 15.08.2022).
12. Бобрин П.П. Энергетическая составляющая железнодорожного тарифа на коридорах шелкового пути. // Материалы Международной научно-практической конференции. Транспорт России: проблемы и перспективы – 2017, 14 -15 ноября 2017 г. СПб.: ИПТ РАН. – Санкт-Петербург, 2017. С. 391-394.
13. Бобрин П.П. Независимая железнодорожная транспортная компания // Транспорт: наука, техника, управление. 2020. №9. С. 24-28.
14. Бобрин П.П. Сухопутное решение для Великого шелкового пути // Транспорт: наука, техника, управление. 2021. №9. С. 4-9.
15. Асаул М.А., Мохов А.Е., Шаталова Н.В. Перспективы строительства евразийского канала // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 1 (80). С. 8-13.
16. Назаров Н.В., Шаталова Н.В. Транспортное развитие приграничных территорий Северо-Запада России // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы. материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 125-летию РУТ(МИИТ). Москва, 2021. С. 146-152.

## References

1. Indeksy kontejnerykh perevozok [Indexes of container transportation] - [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/indeksy-konteinernykh-perevozok-chem-oni-polezny-dlia-investorov> (data obrashheniya: 15.08.2022).
2. Malygin I.G., Makosko A.A., Cyganov V.V. i dr. Infrastruktura Sibiri, Dal'nego Vostoka i Arktiki. Sostoyanie i tri etapa razvitiya do 2050 goda [Infrastructure of Siberia, the Far East and the Arctic. State and three stages of development until 2050]. – М.: IPT RAN, 2019. – 465 s.
3. Borodina O.V., SHatalova N.V. Podgotovka predlozhenij po postroeniyu KTS s elementami intellektual'noj transportnoj infrastruktury i kognitivnoj transportnoj bezopasnosti [Preparation of proposals for the construction of CTS with elements of intelligent transport infrastructure and cognitive transport security] // Tekhnologii postroeniya kognitivnykh transportnykh sistem // Materialy vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. 2021. S. 46-50.
4. Odin poyas i odin put'. [One Belt and One Way] - [Elektronnyy resurs]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B4%D0%B8%D0%BD\\_%D0%BF%D0%BE%D1%8F%D1%81\\_%D0%B8\\_%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD\\_%D0%BF%D1%83%D1%82%D1%8C](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B4%D0%B8%D0%BD_%D0%BF%D0%BE%D1%8F%D1%81_%D0%B8_%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD_%D0%BF%D1%83%D1%82%D1%8C) (data obrashcheniya: 25.07.2022).
5. Malygin I.G., Komashinskij V.I., Kolesnikov M.V., Korolev O.A. Sovremennye problemy postroeniya slozhnykh kognitivnykh transportnykh sistem [Modern problems of building complex cognitive transport systems] // V sbornike: XIV vserossiyskaya mul'tikonferenciya po problemam upravleniya MKPU-2021. Materialy XIV mul'tikonferencii v 4 tomah. Rostov-na-Donu - Taganrog, 2021. S. 156-158.

6. The Silk Road Renaissance and New Potential of the Russian-Chinese Partnership / Podberezkin A., Podberezkina O. // China Quarterly of International Strategic Studies / Volume 01, Issue 02, July 2015.
7. Stoimost' morskikh perevozok dostigla pyatiletnego maksimuma [The cost of sea transportation has reached a five-year high] - [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/08/01/880372-stoimost-perevozok> (data obrashcheniya: 15.08.2022).
8. Transportnye koridory Shelkovogo puti: potentsial rosta gruzopotokov cherez EAES [Silk Road transport corridors: the potential for the growth of cargo flows through the EAEU]. - SPb.: TsII EABR, 2018. - 74 s.
9. Indeksy ERAI, kotirovki [ERAI indices, quotes] - [Elektronnyy resurs]. – URL: <http://index1520.com/index/quotes/> (дата обращения: 15.08.2022).
10. Drozdov B.V. Napravleniya razrabotki fizicheskoy ekonomiki (primenitel'no k transportnomu kompleksu). // Elektronnoe nauchnoe izdanie «Ustoychivoe innovatsionnoe razvitiye: proektirovaniye i upravleniye» [Directions of development of the physical economy (in relation to the transport complex)] // Electronic scientific publication "Sustainable innovative development: design and management", tom 10 № 2 (23), 2014, st. 8 -94. URL: [www.rpravlenie.ru/?p=2022&lang=en](http://www.rpravlenie.ru/?p=2022&lang=en) (data obrashcheniya: 15.08.2022).
11. Drozdov B.V. Novyy shelkovyy put' i tranzitnyy potentsial Rossii. // Nauchno-obrazovatel'nyy sayt Rema. [The New Silk Road and the transit potential of Russia] // Scientific and educational website Rema]. URL: [http://www.rema44.ru/seminar/papers/2015/drozdov\\_shp.doc](http://www.rema44.ru/seminar/papers/2015/drozdov_shp.doc). (data obrashcheniya 15.08.2022)
12. Bobrik P.P. Energeticheskaya sostavlyayushchaya zheleznodorozhnogo tarifa na koridorakh shelkovogo puti. // Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [The energy component of the railway tariff on the corridors of the Silk Road] // Transport Rossii: problemy i perspektivy: materialy of the International Scientific and Practical Conference. Transport of Russia: problems and prospects] – 2017, 14 -15 noyabrya 2017. SPb.: IPT RAN. – Sankt-Peterburg, 2017. P. 391-394.
13. Bobrik P.P. Nezavisimaya zheleznodorozhnaya transportnaya kompaniya [Independent railway transport company] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. - 2020. №9. P. 24-28.
14. Bobrik P.P. Sukhoputnoye resheniye dlya Velikogo shelkovogo puti. [Overland solution for the Great Silk Road] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie - 2021. №9. P. 4-9.
15. Asaul M.A., Mohov A.E., SHatalova N.V. Perspektivy stroitel'stva evraziyskogo kanala [Prospects for the construction of the Eurasian Canal] // Transport Rossijskoj Federacii. 2019. № 1 (80). S. 8-13.
16. Nazarov N.V., SHatalova N.V. Transportnoye razvitiye prigranichnykh territorij Severo-Zapada Rossii [Transport development of the border territories of the North-West of Russia] // Cifrovaya transformatsiya transporta: problemy i perspektivy. materialy Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoj 125-letiyu RUT(MIIT). Moskva, 2021. S. 146-152.

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

**Петр Петрович Бобрик**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем организации транспортных систем, ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: [Bobrikpp@mail.ru](mailto:Bobrikpp@mail.ru)

**Petr P. Bobrik**, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher of Laboratory of the organization of transport systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: [Bobrikpp@mail.ru](mailto:Bobrikpp@mail.ru)

**Наталья Викторовна Шаталова**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: [shatillen@mail.ru](mailto:shatillen@mail.ru)

**Natalia V. Shatalova**, Ph.D. (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: [shatillen@mail.ru](mailto:shatillen@mail.ru)

**Виктор Викторович Вислогузов**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: [smailik0670@gmail.com](mailto:smailik0670@gmail.com)

**Victor V. Visloguzov**, Ph.D. (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: [smailik0670@gmail.com](mailto:smailik0670@gmail.com)

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.08.2022.

**Научная статья**

УДК 004. 931, 621.391.268, 519.25

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.033>

## Новый алгоритм обнаружения и выделения морских объектов от фона в системах наблюдения

Ш.С. Фахми<sup>1,2</sup> shakeebf@mail.ru, О.А. Королев<sup>1</sup> korolev@iptran.ru, О.В. Бородина<sup>1</sup> borodinaov@gmail.com

<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)

**Аннотация.** Основными проблемами при построении систем искусственного зрения в области морского транспорта являются разработка и внедрение эффективных алгоритмов семантического анализа разворачивающихся на месте происшествия событий, позволяющих учитывать влияние внешних и внутренних факторов при процессе распознавания силуэта объекта исследования. При этом к внешним факторам можно отнести внешнее освещение, перемещение морского объекта, его различные признаки и свойства, а к внутренним - скорость обработки сигнала изображения и вычислительную сложность системы наблюдения. Главная задача в области обнаружения и распознавания образов морских объектов состоит в выявлении и отделении на изображениях объекта интереса от фона в условиях шума и помех. В работе предложен новый метод обнаружения и отделения объектов морского транспорта от фона на основе структурированного представления пирамиды изображения, полученной в результате полигонально-рекурсивного разбиения на полигоны различной формы и размера. В статье приведены результаты моделирования предложенного метода, протестированного с использованием различных видеопотоков, и выполнена оценка скорости обнаружения объектов морского транспорта с его помощью, а также представлены результаты его работы в сравнении с уже известными подходами.

**Ключевые слова:** анализ изображения, системы искусственного зрения, силуэт, объект морского транспорта, полигонально-рекурсивный метод, пирамида изображения

**Для цитирования:** Фахми Ш.С., Королев О.А., Бородина О.В. Новый алгоритм обнаружения и выделения морских объектов от фона в системах наблюдения // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 256—264.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.033>

## A new algorithm for detecting and separating marine objects from the background in surveillance systems

Shakeeb S. Fahmi<sup>1,2</sup> shakeebf@mail.ru, Oleg A. Korolev<sup>1</sup> korolev@iptran.ru,

Olga V. Borodina<sup>1</sup> borodinaov@gmail.com

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The main problems in the construction of artificial vision systems in the field of maritime transport are the development and implementation of effective algorithms for the semantic analysis of events unfolding at the scene of the events, which allow taking into account the influence of external and internal factors in the process of recognizing the silhouette of an object of study. In this case, the external factors include external illumination, the movement of a marine object, its various external features and properties, and the internal factors include the speed of image signal processing and the computational complexity of the observation system. The main task in the field of detection and recognition of images of marine objects is to identify and separate the object of interest from the background in images under conditions of noise and interference. The paper proposes a new method for detecting and separating objects of maritime transport from the background based on a structured representation of the image pyramid obtained as a result of polygonal-recursive partitioning into polygons of various shapes and sizes. The article presents the results of modeling the proposed method, tested using various video streams, and the estimation of the speed of detection of objects of maritime transport with its help, as well as the results of its work in comparison with already known approaches.

**Key words** image analysis, artificial vision systems, silhouette, sea transport object, polygonal-recursive method, image pyramid

**For citation:** Shakeeb S. Fahmi, Oleg A. Korolev, Olga V. Borodina. A new algorithm for detecting and separating marine objects from the background in surveillance systems // Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 256—264.

### Введение

При разработке современных систем искусственного зрения и создании приложений по обработке видеоданных [1, 2] для решения задач

наблюдения, распознавания и классификации объектов исследования [3, 4], а также сегментации [5, 6] и кодирования [7, 8] видеоизображений в настоящее время широкое применение нашел подход, при котором выполняется отделение

исследуемых объектов от фона. При этом наиболее распространённый способ, основанный на использовании методики инициализации фона изображения, позволяет описывать изучаемую картину на изображении без каких-либо объектов переднего плана и генерировать четкий фон с последующей возможностью его обработки в приложениях компьютерного зрения или обработки видео. Однако, при практической реализации метод фоновой инициализации сталкивается с некоторыми серьезными проблемами, влияющими на эффективность процесса распознавания, и которые включают:

- изменение освещенности в течение дня;
- фактор движения некоторых исследуемых объектов рассматриваемой картины происхождения, которые могут быть определены как фон;
- дрожание камеры, представляющее серьезную сложность при решении проблемы отделения фона от объекта;
- прерывистое движение второстепенных объектов, также располагающихся на исследуемом изображении и требующих разработки механизмов их выявления и сепарации от представляющих интерес объектов морского транспорта.

Во многих алгоритмах, используемых в системах компьютерного зрения, при решении задач фильтрации или при более сложных механизмах обнаружения и распознавания объектов применяется подход, при котором выполняется сканирование с помощью скользящего поперек изображения окна. При реализации систем технического зрения широко распространены вейвлеты, как математическая основа для класса многомасштабных представлений. Использование многомасштабных пирамид изображений означает, что в ходе обработки изображения выполняется его сканирование несколько раз, что не может не сказаться на эффективности процесса распознавания [9, 10]. В большинстве случаев такой подход действительно является малоэффективным и может потребовать огромных вычислительных затрат, в связи с тем, что области или объекты, представляющие интерес, занимают только небольшую часть пространства изображения, в то время как фон, условно не несущий никакой полезной информации, занимает большую его часть. Проблема оценки фона, которая также известна, как задача вычитания фона, моделирования фона или обнаружения переднего плана-объекта, является популярным подходом при сегментации изображений с целью выделения областей переднего плана, представляющих интерес. Следовательно, применение пирамиды и оценка фона с последующим его вычитанием из объекта интереса позволят проводить дальнейшую обработку с последующим анализом изображений, экономя время вычислений за счет уменьшения объема визуальных данных и сокращения числа итераций из-за использования меньшего количества позиций сканирующего окна.

Однако следует учитывать, что использование подхода фоновой оценки имеет два ограничения:

- во-первых, последовательные кадры в видеопотоке обычно требуются для того, чтобы сравнить их друг с другом и зафиксировать похожие области изображений как фон, при этом объекты

интереса перемещаются между кадрами. Данное обстоятельство исключает применимость фоновой оценки в случаях, когда изображения прерывны и являются полностью независимыми от времени. Однако на практике для большинства реальных приложений существует некоторый непрерывный мониторинг, когда захватывается несколько кадров одного и того же вида;

во-вторых, оценка фона требует определенного вычислительного процессорного ресурса, затраты которого должны быть минимальными, но достаточными для обеспечения расчета требуемой и предварительной оценок фона в сложных алгоритмах анализа изображений. При этом время вычислений является критически важным фактором для обоснования фоновой оценки.

### Постановка задачи исследования

В настоящее время системы видеонаблюдения широко применяются в различных областях жизнедеятельности человека: обеспечении правопорядка на городских улицах, вокзалах, общественном транспорте и т.д.; контроле рабочего процесса на предприятиях, фабриках и т.д. Острая потребность в обеспечении транспортной безопасности привела к необходимости внедрения расширенного функционала в существующие системы видеонаблюдения, например, технологий распознавания лиц, идентификации угроз, обнаружения событий, отслеживания объектов и быстрого расследования инцидентов. При этом главным недостатком с точки зрения обеспечения безопасности почти всех видеосистем наблюдения было и остается отсутствие эффективных методов обработки изображений, в частности, в задачах оперативного обнаружения требуемого объекта.

Визуальное наблюдение за функционированием морского транспорта с целью выявления какого-либо критического события является актуальной и востребованной темой исследований в области обеспечения безопасности движения судов, в частности результаты такого исследования в области морского транспорта позволяют выявлять транспортные аварии, анализируя поток видеоинформации с камер наблюдения. В более общем плане подобные исследования могут решать задачи анализа, описания поведения морского объекта и прогнозирования его дальнейших действий. При этом актуальной с точки зрения практической реализации и построения интеллектуальных транспортных видеосистем является технология «система на кристалле».

С учётом выше сказанного в данной работе решаются следующие задачи:

- разработка метода обнаружения и выделения объектов морских транспортных средств на основе пространственного подхода в структурировании визуальных данных;
- оценка количественных показателей качества обнаружения и выделения объектов на изображениях при различных условиях съёмки;
- тестирование предложенного метода посредством обработки видеоданных, содержащих изображения объектов морского транспорта, двигающихся с различной скоростью и интенсивностью.

### Предлагаемый метод обнаружения и выделения морских объектов

Решение проблемы обработки видеоинформации, поступающей от различных камер наблюдения, представляет собой основу при проектировании интеллектуальных транспортных видеосистем. При этом методика оптимального решения этой задачи должна обеспечивать декомпозицию проектируемой системы на подсистемы передачи и анализа видеоинформации, в ходе которой они должны оптимизироваться отдельно. Следовательно, для построения интеллектуальных транспортных видеосистем на кристалле необходимо разрабатывать эффективные методы и алгоритмы анализа, в частности, обнаружения требуемых объектов с учетом ограничений вычислительных ресурсов.

Рассмотрим подробнее предлагаемый метод. Исходное изображение рекурсивно разбивается на полигоны различной формы и размера в зависимости от степени корреляции соседних пикселей (рис. 1). Далее, для каждого вновь полученного полигона также выполняется анализ корреляции для последующего разбиения.

В результате исходное изображение описывается упорядоченной последовательностью фрагментов-полигонов, обычно располагаемых друг над другом. Отсюда и происходит название – «пирамида изображений».

При таком представлении изображение разбивается на равные полигоны, возможно не пересекающиеся. Затем процедура разбиения повторяется для каждого полигона до тех пор, пока

его размер не станет равным размеру одного бита исходного изображения. Каждому полигону приписывается набор атрибутов: размер, номер уровня, признаки и т.д., являющихся его обобщенной характеристикой.

Процесс обнаружения транспортных объектов делится на несколько этапов и включает следующие основные процедуры:

- 1) приём и формирование последовательности изображений из транспортного видеопотока;
- 2) формирование пирамиды изображения в виде одномерной динамической структуры данных полигонов;
- 3) обнаружение требуемых морских объектов. При этом данная процедура является наиболее сложной и может быть реализована двумя подходами на этапе анализа изображений:
  - а) анализом динамической сцены, когда обнаружение объектов осуществляется путём вычитания кадров и фиксацией областей или пикселей движущихся объектов (отсюда термин - активный пиксель);
  - б) морфологическим пространственным анализом на основе заданных амплитудных и геометрических признаков требуемого объекта на изображении;
- 4) сравнение с шаблоном;
- 5) выдача сигнала обнаружения и классификации объектов.

Рассмотрим подробно второй и третий из перечисленных ранее процедур, т.к. они являются наиболее важными с точки зрения вычислительной сложности.

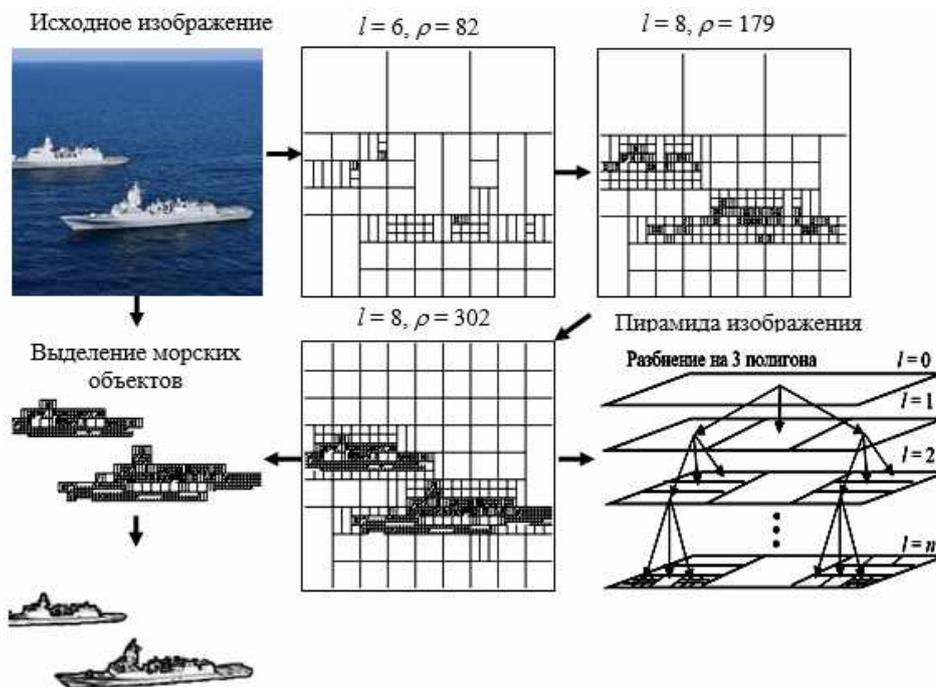


Рис. 1. Построение пирамиды изображения, выделение объектов и формирование опорных векторов

### Формирование пирамиды изображения

Основная проблема при обработке больших визуальных данных заключается в построении эффективной структуры данных, позволяющей преобразовать исходное изображение в новую

структуру представления пространственных двумерных изображений таким образом, чтобы можно было сохранить взаимосвязь элементов и получить доступ к каждому пикселю после сжатия. Такая структура данных представляет собой одномерный динамический массив (ОДМ),

позволяющий получить быстрый доступ к элементам всех уровней пирамиды нестационарного изображения (рис. 2).

Исследования, проведенные в ИПТ РАН, показали, что лучшим способом описания ОДМ и взаимосвязей всех полигонов на всех уровнях пирамиды является группировка массива с учетом числа полигонов после разбиения ( $d$ ) и номера соответствующего уровня ( $l$ ).

Полигоны разделяются на три типа:

а) составной полигон (СП), подлежащий разбиению и имеющий отрицательное значение в ОДМ (признак  $\Pi_{p1}$ );

б) простой полигон (ПП), содержащий информацию (признак  $\Pi_{p2}$ ) о морских объектах (амплитудные-яркостные и геометрические – координаты контуров);

в) однородный полигон, не содержащий никакой информации (признак  $\Pi_{p3}$ ).

Важно отметить, что размер полигона зависит от заданного порога по яркости для разбиения ( $\rho$ ). Чем выше значения порога, тем больше размер простого полигона. С другой стороны, размер также зависит от наличия в пределах полигона требуемых объектов, которые необходимо отделить от фона. Там, где больше деталей, полигон мельче и, наоборот, крупнее, где преобладают однородные области на изображениях. Следовательно, возникает задача математической оценки следующих функций в результате разбиения: 1) зависимости количества полигонов от заданного порога; 2) функциональной корреляции однородных, составных и простых полигонов; 3) определения оптимального разбиения с точки зрения скорости обработки видеoinформации.

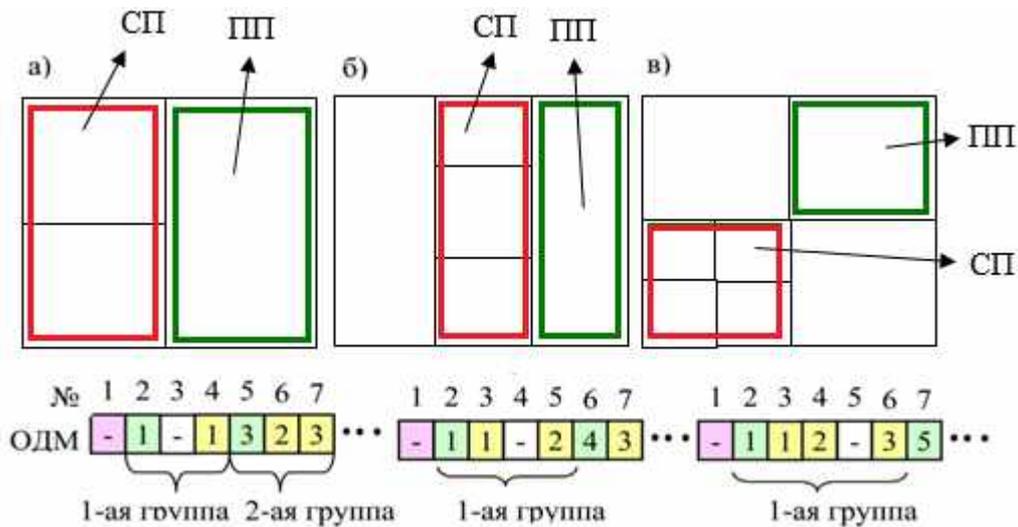


Рис. 2. Структура данных пирамиды изображений и одномерный динамический массив: а) при делении на 2 ( $d = 2$ ); б) при делении на 3 ( $d = 3$ ); в) при делении на 4 ( $d = 4$ )

Математический аппарат полигонально-рекурсивного метода (ПРМ). Поставленная математическая задача определения количества полигонов всех типов и взаимосвязи между ними решается следующим образом.

Вводим следующие обозначения:  $l$  – количество информации для передачи ОДМ;  $l = l_1 + l_2$ , где  $l_1$  – количество информация для кодирования полигонов,  $l_2$  – количество информации для кодирования контуров объектов в простых полигонах, сопутствующее  $\Pi_{p2}$ .

В работах авторов [7, 16], доказано, что общее число признаков  $x$  оценивается по формуле:

$$x = \frac{(d(n + \Delta n) - 1)}{(d - 1)},$$

где  $\Delta n$  – количество однородных полигонов, т. е. количество  $\Pi_{p3}$  в сжатом описании. Количество  $\Pi_{p2}$  равно числу простых полигонов ( $n$ ).

По результатам экспериментов, проведенных по моделированию алгоритмов разбиения и анализу полученных ОДМ для различных классов изображений [17], установлено, что количество составных полигонов ( $\Pi_{p1}$ ) составляет:

$$x_1 = x - n - \Delta n.$$

Для кодирования полигонов всех типов были применены известные коды Хаффмана, следовательно, по результатам сравнения величин  $x_1$ ,  $n$ , и  $\Delta n$ , получено:

- 1) при  $d = 2: x_1 > n$  и  $\Delta n$ ,
- 2) при  $d > 2: n > x_1$  и  $\Delta n$ , если  $E \leq 1$  и,
- 3)  $\Delta n > x_1, n$ , если  $E > 1$ , где  $E = \frac{\Delta n}{n}$ ,

следовательно, применив различные значения вышеуказанных  $x_1$ ,  $n$ , и  $\Delta n$  и проанализировав корреляции полученных результатов можно записать следующие рекуррентные отношения:

$$I_1 = \begin{cases} \ell \cdot x_1 + 2(n + \Delta n), \text{ при } d = 2; \\ \ell \cdot n + 2(x_1 + \Delta n), \text{ при } d > 2 \text{ и } E \leq 1; \\ \ell \cdot \Delta n + 2(x_1 + n), \text{ при } d > 2 \text{ и } E > 1. \end{cases}$$

Следует отметить, что компактного представление и описание контуров в пределах простых полигонов потребует число бит, которое зависит от уровня разбиения  $\ell$  (рис. 1). Пиксель будет являться неотделимым полигоном уровня  $M$ , тогда:

$$I_2 = \sum_{l=1}^m z_l r_l$$

$$I = \log d \left( n_H M - \left( \frac{1}{d^M} \right) \sum_{l=1}^m l z_l \right)$$

где  $z_l$  – число полигонов, содержащих контуры объектов уровня  $l$ ;  $r_l$  – число бит для кодирования простых полигонов.

Полигон уровня  $l$  имеет  $\frac{N}{d^l}$  пикселей, а  $r_l = \log \frac{N}{d^l}$ .

Подставим выражение  $I_1$  и  $I_2$  в  $I$  и, учитывая, что  $r_l = \log \frac{N}{d^l}$ , получим:

$$I = \log d \left( n_H M - \left( \frac{1}{d^M} \right) \sum_{l=1}^m l z_l \right) + \begin{cases} 3n_H E(E + 1), \text{ при } d = 2 \\ n_H \frac{(2dE + d + 1)}{(d - 1)}, \text{ при } d > 2 \end{cases}$$

### Обнаружение объектов интереса – морских объектов

Обнаружение морских объектов может быть выполнено двумя способами:

а) путём оценки разности между кадрами для фиксации движущихся объектов (см. рис. 3). Данный способ, часто встречающийся на практике, имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что при оценке разности кадров фиксируются не только требуемые объекты интереса, но и любые движущиеся объекты, что приводит к необходимости решения дополнительной и более сложной задачи фильтрации;

Окончательное нормированное выражение функциональной корреляционной функции полигонов всех типов будет:

б) путём поиска объектов на изображениях по заданным амплитудным и геометрическим признакам. Очевидно, второй вариант решения задачи обнаружения является более сложным и требует огромных вычислительных затрат, при этом, существенным его достоинством является:

- высокая точность обнаружения;
- управление параметрами поиска объектов интереса: порог разбиения, число уровней пирамиды, точность распознавания, размер полигонов и т.д.

Алгоритм обнаружения морских объектов. Алгоритм по реализации предложенного ПРМ обнаружения и отделения объекта от фона включает следующие основные процедуры:

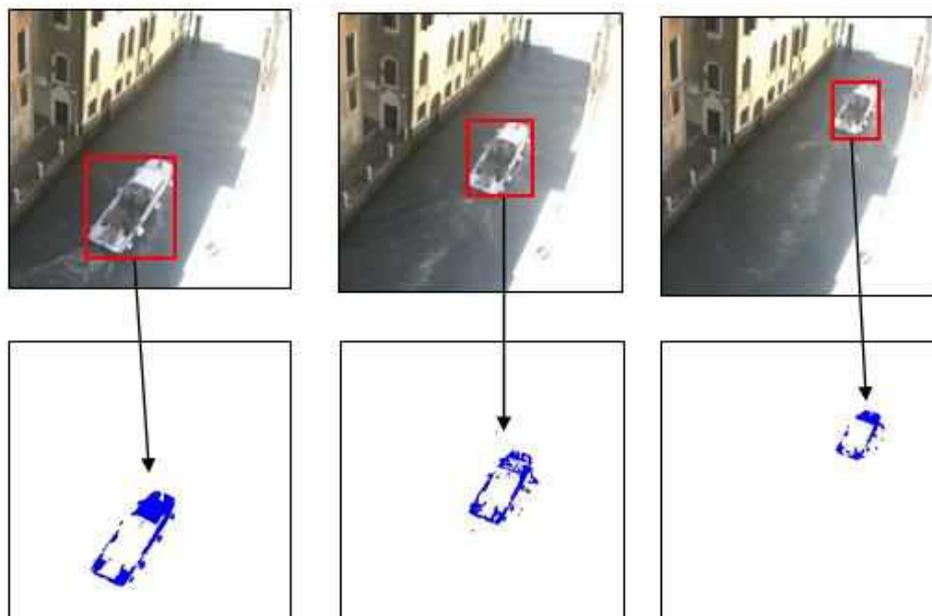


Рис. 3. Обнаружение объекта путем фиксации разности кадров движущегося морского транспортного средства

- 1) инициализация переменных, задание порога разбиения ( $\rho$ ) и числа полигонов после разбиения ( $d$ ), разбиение исходного изображение и формирование пирамиды в виде ОДМ;
- 2) задание признаков требуемого объекта (формы, размера, яркости и т.д.);

- 3) нахождение в структуре данных ОДМ начальный опорный простой полигон (рис. 4) требуемого объекта;
- 4) поиск соседних полигонов по ОДМ (рис. 4);

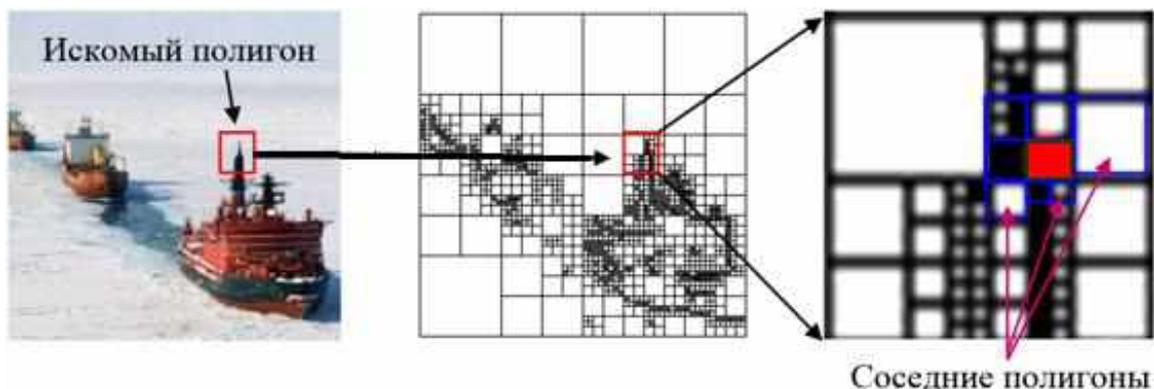


Рис. 4. Нахождение соседних полигонов для искомого полигона

- 5) отделение найденного объекта из ОДМ в виде связанного списка простых полигонов (см. рис. 1);
- 6) формирование опорных векторов требуемого объекта ( $\vartheta$ );
- 7) сравнение с шаблонами из обучаемой выборки для случая распознавания с учителем.

Проверка предложенного алгоритма была выполнена с использованием различных транспортных сюжетов, полученных из компактной представительной выборки сюжетов морского транспорта.

#### Результаты моделирования алгоритмов отделения объекта от фона

Для выполнения корректной оценки эффективности работы алгоритмов обнаружения и выделения морских объектов на исходных

изображениях предлагается сравнивать результаты их обработки при меняющихся условиях видеосъемки, а именно: при разной степени освещенности, наличии теней, присутствии подвижного фона, роль которого может выполнять рекламный баннер с постоянно меняющимся изображением, дрожании камеры и т.д. Для учета этих факторов в работе предлагается ввести шесть метрик, с помощью которых обеспечивается общий подход в оценке алгоритмов выделения морских объектов от фонового изображения (см. рис. 5.):

AGE (Average Gray-level Error) – средняя ошибка уровня серого, т.е. среднее значение абсолютной разницы между показателем, характеризующим яркость основной фоновой области изображения (GT), и показателем, характеризующим яркость сгенерированного фонового изображения (BI);

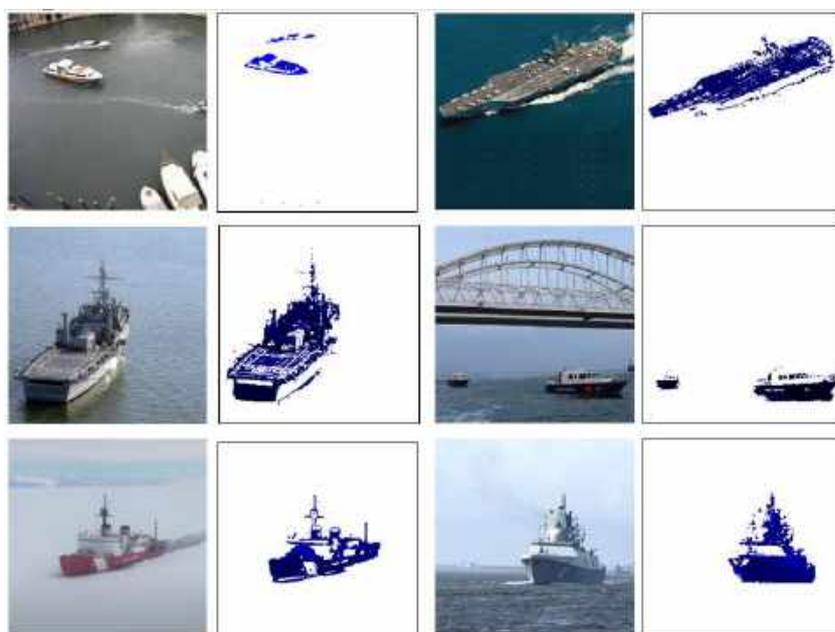


Рис. 5. Результаты моделирования алгоритмов отделения объектов от фона

рEPs (Percentage of Error Pixels) - количество пикселей в BI, значение которых отличается от значения соответствующего пикселя в GT более чем на заданный порог ( $\rho$ );

рCEPs (Percentage of Clustered Error Pixels) – процент кластеризованных пикселей ошибок, т.е.

процент количества пикселей, у которых 4 соседних также являются пикселями ошибок, по отношению к общему количеству пикселей в изображении;

PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) - широко используемая метрика для измерения качества BI по сравнению с GT, которая вычисляется по формуле:

$$PSNR = 10 \log \frac{255^2}{MSE}$$

где MSE (mean squared error) – среднеквадратическое отклонение яркости исходного изображения от результирующего, которое вычисляется по формуле:

$$MSE = \frac{1}{N \times M} \sum (Image_{in} - Image_{out})^2;$$

MS-SSIM (Multi-scale Structural Similarity Index) – многомасштабный индекс структурного сходства для оценки воспринимаемого визуального искажения;

CQM (Color image Quality Measure) – индекс качества цветного изображения. На практике он

принимает значения в db и чем выше значение CQM, тем лучше фоновая оценка.

В ходе тестирования предложенного полигонально-рекурсивного метода разбиения изображения на полигоны различной формы были получены результаты количественных оценок работы алгоритмов, выполняющих задачу отделения объекта от фона, отраженные в таблице. При этом использованы видеоданные, взятые из открытых источников [14] и содержащие изображения объектов морского транспорта, движущихся с различной скоростью и интенсивностью.

Таблица

Результаты количественной оценки работы алгоритмов отделения объекта от фона

Номер изображения	Метод	AGE	pEPs	pCEPs	PSNR	VS-SSIM	CQM
1	LaBGen-OF	1.84	0.01	0.01	0.98	34.65	35.41
	LaBGen-P-Semantic (MP+U)	1.97	0.002	0.001	0.99	34.8	35.56
	ПРМ	1.7	0.00	0.00	0.99	37.52	39.92
2	LaBGen-OF	19.6	0.4	0.26	0.93	19.4	20.9
	LaBGen-P-Semantic (MP+U)	17.6	0.27	0.18	0.86	18.49	20.083
	ПРМ	8.6	0.003	0.001	0.99	37.52	34.75
3	LaBGen-OF	1.7	0.00	0.00	0.98	38.6	39.08
	LaBGen-P-Semantic (MP+U)	1.51	0.00	0.00	0.99	41.44	41.47
	ПРМ	1.10	0.00	0.00	0.99	43.52	47.75
4	LaBGen-OF	11.98	0.15	0.03	0.87	20.2	21.7
	LaBGen-P-Semantic (MP+U)	11.1	0.14	0.02	0.86	20.45	21.86
	ПРМ	4.2	0.06	0.00	0.99	31.52	29.52
5	LaBGen-OF	2.32	0.004	0.00	0.99	36.5	36.8
	LaBGen-P-Semantic (MP+U)	2.10	0.003	0.001	0.99	37.52	37.72
	ПРМ	1.10	0.001	0.00	0.99	39.52	38.12
6	LaBGen-OF	2.35	0.006	0.001	0.93	36.4	36.7
	LaBGen-P-Semantic (MP+U)	2.14	0.001	0.00	0.97	37.51	37.73
	ПРМ	1.99	0.001	0.00	0.99	39.57	38.22

**Заключение**

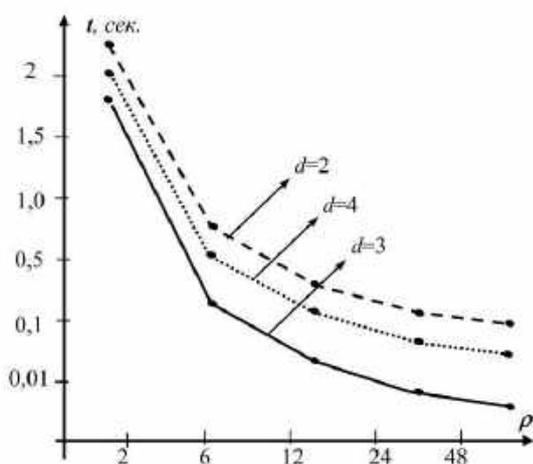


Рис. 6. Зависимость времени обнаружения объектов от установленного порога яркости при разбиении изображений для различных d

В работе рассмотрены различные алгоритмы обнаружения и отделения объектов морского транспорта от фона изображения на основе предложенного нового полигонально-рекурсивного метода разбиения изображения на одинаковые полигоны различных форм и размеров.

Полученные результаты показали, что наилучшее время обнаружения морских объектов при приемлемом субъективном качестве обеспечивается при условии разбиения изображения на три полигона d = 3 (см. рис. 6).

Эксперименты проводились с использованием видеоданных, полученных из открытых источников, при условии изменения освещенности и интенсивности движения транспортных средств. Результаты показали (см. табл.), что предложенный метод превосходит аналоги при выполнении процесса обработки изображений различных классов, при этом для распознавания фонового движения предлагаемый подход позволяет получать результаты, сравнимые с показателями метода LaBGen-P-Semantic (MP+U), который признан лучшим при решении подобных задач.

### Литература

1. Hofmann M., Tiefenbacher P., Rigoll G. Background segmentation with feedback: The Pixel-Based Adaptive Segmenter // In Proceedings of the 2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – Providence, RI, USA: IEEE, 2012. – pp. 38-43.
2. Stauffer C., Grimson E. Adaptive Background Mixture Models for Real-time Tracking // In Proceedings of the 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Collins, CO, USA: IEEE, 1999. – pp. 246-252.
3. Малыгин И.Г., Королев О.А. Классификация изображений чрезвычайных ситуаций на автомобильном транспорте по статистическим и амплитудным свойствам // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2021. – № 1 – С. 125-135.
4. Крюкова М.С., Фахми Ш.С. Сегментация полутоновых изображений лесных пожаров на основе дисперсионного анализа // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2019. – № 3. – С. 103-111.
5. Chiu C., Ku M., Liang L. A robust object segmentation system using a probability-based background extraction algorithm // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2010. – Vol. 20, №4. – pp. 518–528.
6. Fahmi S.S. The threshold segmentation method of sea ships images / S.S. Fahmi, S.A. Seliverstov, V.V. Visloguzov, V.V. Krymskii // Marine intellectual technologies. – 2019. – Vol. 4, № 2. – pp. 69-78.
7. Иванов А.В., Фахми Ш.С. Методы, алгоритмы и устройства кодирования и декодирования изображений: монография. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация ВУЗ, 2019. – 260 с.
8. Malygin I.G., Korolev O.A. High-speed algorithm for transmitting video information about emergency situations on transport objects // Marine intellectual technologies. – 2021. – Vol. 1, № 1. – pp. 64 – 70.
9. Lei T., Jia X., Zhang Y., Liu S., Meng H., Nandi A.K. Superpixelbased fast fuzzy c-means clustering for color image segmentation // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018. Vol. 27, №9, pp. 1753–1766.
10. Fahmi S.S. Hybrid conversion method of marine images /S.S. Fahmi, N.V. Shatalova, S.A. Seliverstov, Y.A. Hasan, N.-T.M. Abduljabbar, A.V. Ivanov // Marine intellectual technologies. – 2019. – Vol. 3, № 3. – pp. 121-131.
11. Kostikova E.V. The fast algorithm of spectral transformation of images in video surveillance systems / E.V. Kostikova, S.S. Fahmi, Y.A. Hasan, S.A. Seliverstov, A.V. Sobolev, N.V. Podoprigora // Marine intellectual technologies. – 2020. – Vol. 1, № 2. – pp. 142 – 151.
12. Фахми Ш.С., Костинова Е.В., Королёв О.А. Видеосистема наблюдения за дорожным движением в реальном времени // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2020: материалы международной-научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 9-10 ноября 2020 г. – СПб.: ИПТ РАН, 2020. – Т.1. – С. 344-352.
13. Fahmi S.S. The recurrent relations for estimation of encoding and image transmission transport subsystems parameters / S.S. Fahmi, S.N. Turusov, N.V. Shatalova, M.A. Asaul // Marine intellectual technologies. – 2020. – Vol. 1, №1. – pp. 99-106.
14. A dataset for testing background estimation algorithms, <http://scenebackgroundmodeling.net/>.

### References

1. Hofmann M., Tiefenbacher P., Rigoll G. Background segmentation with feedback: The Pixel-Based Adaptive Segmenter // In Proceedings of the 2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – Providence, RI, USA: IEEE, 2012. – pp. 38-43.
2. Stauffer C., Grimson E. Adaptive Background Mixture Models for Real-time Tracking // In Proceedings of the 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Collins, CO, USA: IEEE, 1999. – pp. 246-252.
3. Malygin I.G., Korolev O.A. Klassifikatsiya izobrazheniy chrezvychaynykh situatsiy na avtomobil'nom transporte po statisticheskim i amplitudnym svoystvam [Classification of emergency images by static and amplitude properties] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii. – 2021. – № 1 – S. 125-135.
4. Kryukova M.S., Fakhmi SH.S. Segmentatsiya polutonovykh izobrazheniy lesnykh pozharov na osnove dispersionnogo analiza [Segmentation of gray scale images of forest fires on the basis of variance analysis] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS Rossii. – 2019. – № 3. – S. 103-111.
5. Chiu C., Ku M., Liang L. A robust object segmentation system using a probability-based background extraction algorithm // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2010. – Vol. 20, №4. – pp. 518–528.
6. Fahmi S.S. The threshold segmentation method of sea ships images / S.S. Fahmi, S.A. Seliverstov, V.V. Visloguzov, V.V. Krymskii // Marine intellectual technologies. – 2019. – Vol. 4, № 2. – pp. 69-78.
7. Ivanov A.V., Fakhmi SH.S. Metody, algoritmy i ustroystva kodirovaniya i dekodirovaniya izobrazheniy [Methods, algorithms and devices for encoding and decoding images]: monografiya. – SPb.: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya VUZ, 2019. – 260 s.
8. Malygin I.G., Korolev O.A. High-speed algorithm for transmitting video information about emergency situations on transport objects // Marine intellectual technologies. – 2021. – Vol. 1, № 1. – pp. 64 – 70.
9. Lei T., Jia X., Zhang Y., Liu S., Meng H., Nandi A.K. Superpixelbased fast fuzzy c-means clustering for color image segmentation // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018. Vol. 27, №9, pp. 1753–1766.
10. Fahmi S.S. Hybrid conversion method of marine images /S.S. Fahmi, N.V. Shatalova, S.A. Seliverstov, Y.A. Hasan, N.-T.M. Abduljabbar, A.V. Ivanov // Marine intellectual technologies. – 2019. – Vol. 3, № 3. – pp. 121-131.

11. Kostikova E.V. The fast algorithm of spectral transformation of images in video surveillance systems / E.V. Kostikova, S.S. Fahmi, Y.A. Hasan, S.A. Seliverstov, A.V. Sobolev, N.V. Podoprigora // Marine intellectual technologies. – 2020. – Vol. 1, № 2. – pp. 142 – 151.
12. Fakhmi SH.S., Kostikova Ye.V., Korolev O.A. Video sistema nablyudeniya za dorozhnym dvizheniyem v real'nom vremeni [Real-time video system for traffic surveillance] // Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2020: materialy mezhdunarodnoy-nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 9-10 noyabrya 2020 g. – SPb.: IPT RAN, 2020. – Т.1. – S. 344-352.
13. Fahmi S.S. The recurrent relations for estimation of encoding and image transmission transport subsystems parameters / S.S. Fahmi, S.N. Turusov, N.V. Shatalova, M.A. Asaul // Marine intellectual technologies. – 2020. – Vol. 1, №1. – pp. 99-106.
14. A dataset for testing background estimation algorithms, <http://scenebackgroundmodeling.net/>.

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

**Шакиб Субхиевич Факми**, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. Тел. +7(812) 321-95-68

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. Тел. +7(812) 234-36-75. e-mail: shakeebf@mail.ru

**Олег Александрович Королев**, научный сотрудник лаборатории проблем безопасности транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13. Тел. +7(812) 323-29-54, e-mail: korolev@iptran.ru

**Ольга Владимировна Бородина**, научный сотрудник лаборатории интеллектуальных транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13. Тел. +7(812) 323-29-54, e-mail: borodinaov@gmail.com

**Shakeeb S. Fahmi**, Dr.Sci. (Eng), assistant professor, leading researcher of the Laboratory of Intelligent transport systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: shakeebf@mail.ru

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. Tel. +7(812) 234-36-75, e-mail: shakeebf@mail.ru

**Oleg A. Korolev**, researcher of the Laboratory of vehicle safety systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812)323-29-54, e-mail: korolev@iptran.ru

**Olga V. Borodina**, researcher of the Laboratory of Intelligent transport systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812)323-29-54, e-mail: borodinaov@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.08.2022.

## Научная статья

УДК 303.732.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.034>

## Применение генетических алгоритмов для решения транспортных задач

Н.А. Полковникова<sup>1</sup> natalia-polkovnikova@mail.ru, А.К. Полковников<sup>1</sup> polkov5@mail.ru<sup>1</sup> Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** В статье рассматривается решение классической NP-трудной задачи о коммивояжёре с применением модифицированного генетического алгоритма (ГА). Если в задаче коммивояжёра количество пунктов назначения больше 66, то задача становится трансвычислительной (превышает предел Бремерманна) и метод полного перебора становится неприменим в связи с высокой вычислительной сложностью. Для решения подобных NP-полных оптимизационных задач высокую эффективность показали ГА. Основная особенность ГА состоит в том, что анализируется не одно решение, а некоторое подмножество квазиоптимальных решений (маршрутов), называемых хромосомами и состоящие из генов (пунктов назначений). Решению задачи соответствует хромосома с наилучшим значением целевой функции. В разработанном ГА при реализации скрещивания предлагается два варианта: одноточечный или двухточечный кроссовер. Особенностью разработанного ГА является способность эффективно работать на популяциях с малым числом хромосом, что уменьшает вычислительную сложность алгоритма. Представлены результаты тестирования работы модифицированного ГА на бенчмарке из 70 пунктов назначений в среде Matlab 2021a, полученный результат показывает сходимость на тестовой выборке и высокую эффективность ГА. Решение задачи коммивояжёра также реализовано в виде программы в среде MS Visual Studio 2022 на языке Visual C# с возможностью загрузки географической карты и настройкой основных характеристик ГА (выбор количества хромосом, вероятность мутации, количество итераций). Результаты поиска наименьшего пути по указанным 15 городам на карте Краснодарского края показывают высокую эффективность применения ГА для решения транспортных задач. Практическое применение задачи коммивояжёра с использованием модифицированного ГА использовано при составлении оптимального маршрута для развоза товаров по заданным точкам на карте г. Новороссийска.

**Ключевые слова:** эволюционные вычисления, генетические алгоритмы, роевой интеллект, оптимизация роя частиц, задача коммивояжёра, задача маршрутизации транспорта

**Для цитирования:** Полковникова Н.А., Полковников А.К. Применение генетических алгоритмов для решения транспортных задач, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 265—273.

## Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.034>

## Application of genetic algorithms for solving transport problems

Natalia A. Polkovnikova<sup>1</sup> natalia-polkovnikova@mail.ru, Anatoly K. Polkovnikov<sup>1</sup> polkov5@mail.ru<sup>1</sup> Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** The article considers the solution of classical NP-hard traveling salesman problem (TSP) using modified genetic algorithm (GA). If in TSP the number of destinations is more than 66, then the problem becomes transcomputational (exceeds the Bremermann's limit) and the brute force method becomes inapplicable due to high computational complexity. To solve such NP-complete optimization problems, GAs have shown high efficiency. The main feature of GA is that it analyzes not one solution, but a subset of quasi-optimal solutions (routes) called chromosomes and consisting of genes (destinations). The solution of the problem corresponds to the chromosome with best value of the objective function. In the developed GA, when implementing crossing, two options are offered: a single-point or two-point crossover. The distinctive feature of proposed modified GA is the ability to work effectively on populations with a small number of chromosomes, which reduces the computational complexity of the algorithm. The work results of modified GA on a benchmark of 70 destinations in Matlab 2021a environment are presented, obtained result shows the convergence on test set and high efficiency of GA. The solution of TSP is also implemented as a program in MS Visual Studio 2022 in Visual C# with the ability to load a geographic map and set the main characteristics of GA (selection of the number of chromosomes, mutation probability, number of iterations). The results of shortest path search for indicated 15 cities on the map of the Krasnodar region show high efficiency of GA for solving transport problems. The practical application of TSP using modified GA proposed in compiling the optimal route for delivering goods to given points on the map of Novorossiysk city.

**Keywords:** evolutionary computation, genetic algorithms, swarm intelligence, particle swarm optimization, travelling salesman problem, vehicle routing problem

**For citation:** Natalia A. Polkovnikova, Anatoly K. Polkovnikov, Application of genetic algorithms for solving transport problems, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 265—273.

## Введение

Важной составляющей современной системы производства является транспортная логистика (ТЛ).

Современная ТЛ включает планирование и организацию оптимальных схем грузоперевозок с минимизацией затрат. Задачи маршрутизации транспорта представляют процесс определения

наименьшего пути при транспортировке груза в  $N$  пунктов назначения. Проблема для лица, принимающего решения (ЛПР) при решении такой задачи заключается в неполноте, неточности информации и многофакторности описания транспортной среды.

Для решения сложных задач маршрутизации необходима апробация разработанных решений на более простых задачах, таких как задача коммивояжера (фр. «*commis voyageur*»). Задача коммивояжера – одна из самых известных задач комбинаторной оптимизации, является классической задачей транспортной логистики и теории графов [1].

Задача о коммивояжере относится к NP-трудным (от англ. «*Non-deterministic polynomial*» – «недетерминированные с полиномиальным временем») – это полиномиально проверяемые задачи, для которых отсутствуют быстрые алгоритмы решения. Её успешное решение даёт понимание о том, насколько адаптирован разработанный метод для задач маршрутизации. Время работы алгоритмов решения таких задач существенно (обычно, экспоненциально) возрастает с увеличением объёма входных данных. Однако, если предоставить алгоритму некоторые дополнительные сведения (так называемый «сертификат решения»), то временные затраты могут быть существенно снижены. Алгоритмы для решения задач из класса NP используются в огромном количестве областей, например, при восстановлении частично поврежденных файлов, разложении числа на простые множители в криптографии, оптимизации различных маршрутов и размеров доставляемых товаров в логистике, организации структуры инфокоммуникационных сетей и т. д. [2-7]. Обобщение задачи коммивояжера и её разновидности применяются для транспорта и логистики, когда несколько транспортных средств ограниченной грузоподъемности должны обслуживать и клиентов, посещая их в заданные временные окна. Например, задача маршрутизации транспортных средств с ограничением на грузоподъемность (англ. «*Capacitated vehicle routing problem*»), задача доставки продуктов питания в магазины, подвода электроэнергии к потребителям, построения кольцевой линии электропередач, а также различные задачи, возникающие при автоматизации монтажа схем, при построении оптимального маршрута морского судна. Значительно более эффективное решение подобных задач могло бы снизить финансовые затраты и время, поскольку современные методы не являются достаточно быстрыми и находят лишь приближенные решения.

### Постановка задачи

Задача коммивояжера (англ. «*Travelling Salesman Problem*», TSP) трактуется следующим образом: необходимо посетить  $N$  городов, не заезжая в один и тот же город дважды, и вернуться в исходный пункт по маршруту с минимальной стоимостью (длина пути должна быть минимальной). В условиях задачи указываются критерий выгодности маршрута (кратчайший, самый дешёвый, совокупный критерий

и тому подобное) и соответствующие матрицы расстояний, стоимости и т. д. Решение задачи коммивояжера применяется для оптимизации различных маршрутов и размеров доставляемых товаров в логистике, для проектирования развозки коммуникаций, организации структуры инфокоммуникационных сетей, разработки архитектуры вычислительных сетей, размещения компонентов СБИС и т. д.

Формальное представление задачи коммивояжера выражается следующим образом: задан граф  $G = (X, U)$ , где  $|X| = n$  – множество вершин (городов),  $|U| = m$  – множество рёбер (возможные пути между городами). Дана матрица чисел  $D(i, j)$ , представляющая стоимость транспортировки из вершины  $x_i$  в  $x_j$ , где  $i, j \in 1, 2, \dots, n$ . Все рассматриваемые графы полносвязные, поэтому задаются только координаты вершин, а веса рёбер определяются как декартово расстояние между вершинами:

$$D(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

Целью является найти кратчайший гамильтонов цикл т.е. замкнутый путь, проходящий через каждую вершину графа ровно по одному разу и при этом имеющий минимальную суммарную стоимость среди всех возможных гамильтоновых циклов. Кратчайший гамильтонов цикл является перестановкой  $\varphi$  из элементов множества  $X$ , такой, что целевая функция  $F$  (т.е. длина маршрута) стремится к минимуму:

$$F(\varphi) = D(\varphi(1), \varphi(n)) + \sum_i \{D(\varphi(i), \varphi(i+1))\} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\varphi(1)$  – первая вершина (город),  $\varphi(n)$  – последняя вершина из заданного множества.

Вычислительная сложность задачи коммивояжера заключается в том, что если имеются 20 городов, то общее количество возможных решений составляет:

$$S = \frac{(N-1)!}{2} = \frac{(20-1)!}{2} = \frac{121645,100409 \times 10^{12}}{2} \approx 60\,822\,550\,204\,400\,000 \approx 60 \text{ квадриллионов решений}$$

Задача коммивояжера становится трансвычислительной для  $N > 66$ , поскольку  $66! \approx 5,443449391 \times 10^{92}$ , а  $67! \approx 3,647111092 \times 10^{94}$ . Трансвычислительная задача (англ. «*Transcomputational problem*») в теории сложности вычислений – это задача, для решения которой требуется обработка более чем  $10^{93}$  бит информации. Число  $10^{93}$  называется «пределом Бремерманна».

Таким образом, решение задачи коммивояжера методом полного перебора превышает предел Бремерманна, когда городов больше 66. Полученное число слишком велико, чтобы проверять каждое из возможных решений.

Для решения NP-полных оптимизационных задач, в частности, для решения задачи коммивояжера высокую эффективность показали генетические алгоритмы (ГА).

### Принцип работы генетического алгоритма

Основоположником современной теории генетических алгоритмов (ГА) считается Д.Х. Холланд (J.H. Holland), его интересовала, прежде всего, способность природных систем к адаптации, а конечной целью – создание такой системы, которая могла бы приспосабливаться к любым условиям окружающей среды. В 1975 году Д.Х. Холланд в работе «Adaptation in Natural and Artificial Systems» впервые ввёл термин «генетический алгоритм» и предложил схему классического генетического алгоритма («canonical GA»).

Генетический алгоритм – это алгоритм, который позволяет найти квазиоптимальные и оптимальные решения к аналитически неразрешимым или труднорешаемым задачам через последовательный подбор и комбинирование искомых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. Генетические алгоритмы представляют собой адаптивный поисковый метод, который основан на селекции наилучших решений в популяции по принципу («survival of the fittest» – «выживает наиболее приспособленный»), подобно эволюционной теории Ч. Дарвина. В дальнейшем понятие «генетические алгоритмы» стало очень широким, и зачастую к ним относятся алгоритмы эволюционного моделирования (эволюционных вычислений), в которые входят: эволюционные стратегии (Кеннет Де Йонг, Д. Голдберг, И. Реченберг, Г. Шефель), эволюционное программирование (Л. Фогель, А. Оуэнс, М. Уолш) и генетическое программирование (Дж. Коза).

Формально ГА представляется семью параметрами:

$$\langle P^0, \lambda, l, s, \rho, f, t \rangle, \quad (3)$$

где  $P^0 = (a_1^0, a_2^0, \dots, a_\lambda^0)$  – исходная популяция хромосом (альтернативных решений, возможных маршрутов);

$a_i^0$  – решение задачи, представленное в виде хромосомы ( $1 \leq i \leq \lambda$ );

$\lambda$  – целое число (размер популяции);

$l$  – целое число (длина каждой хромосомы);

$s$  – оператор отбора;

$\rho$  – отображение, определяющее рекомбинацию (скрещивание и мутацию);

$f$  – функция оптимальности;

$t$  – счётчик поколений (критерий останова).

В начале работы ГА формируется первое поколение хромосом (решений) случайным образом (рис. 1).

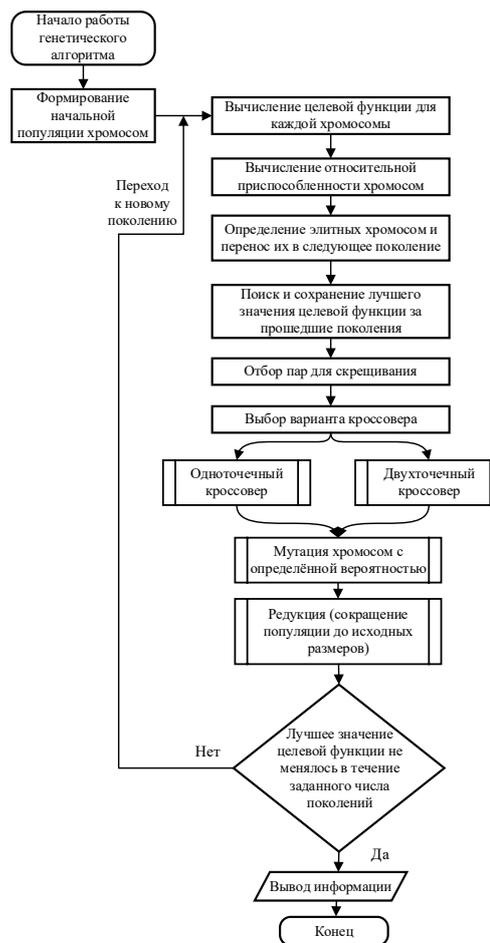


Рис. 1. Структурная схема генетического алгоритма

При реализации генетических операторов одним из важнейших вопросов является определение места и количества точек разрыва хромосом. При этом большое количество точек разрыва может привести к полной потере лучших решений, а малое количество точек разрыва часто приводит к попаданию решения в локальный оптимум, далёкий от глобального. Поэтому в разработанном ГА при реализации скрещивания предлагается два варианта: одноточечный или двухточечный кроссовер.

Далее посредством вычисления и сравнения значений целевой функции для каждой хромосомы происходит отбор нескольких элитных хромосом. Элитными являются те хромосомы, у которых полученные значения (в данной работе длина пути коммивояжера) являются наименьшими. Длина хромосомы остается постоянной на протяжении всей работы ГА. Наряду с битовым представлением, хромосома может быть представлена совокупностью:

- действительных чисел, например: [33,2 – 12,4 5,3 ...];
- правил, например: [R<sub>1</sub> R<sub>2</sub> R<sub>3</sub> ... R<sub>n</sub>];
- перестановкой элемента, например: [1234 1324 1432 ...];
- любой другой структурой данных.

В ГА возможно использовать несколько видов скрещивания: одноточечный и двухточечный кроссовер. Отбор пар для скрещивания осуществляется при помощи генератора случайных чисел. На следующем этапе хромосомы нового поколения с некоторой вероятностью подвергаются мутации. Мутация – случайное изменение одной или нескольких позиций в хромосоме. Мутации являются двигателем естественного отбора, так как обеспечивают поддержание разнообразия хромосом в популяции. Мутация обеспечивает случайный выбор новой точки в пространстве потенциальных решений. Как правило, вероятность мутации ( $p_m$ ) – это число в диапазоне:

$$p_m \in \left( \frac{1}{\text{размер популяции}}, \frac{1}{\text{длина хромосомы}} \right) \quad (4)$$

Таким образом, оператор мутации с вероятностью  $p_m$  изменяет значение гена в хромосоме на противоположное.

При процедуре редукции расширенная популяция сокращается до исходного размера за счёт удаления из неё хромосом с наихудшими значениями целевой функции. Окончание процесса эволюции происходит, если лучшее значение целевой функции не изменяется в течение заданного числа поколений. Генетический алгоритм представляет собой комбинированный метод решения оптимизационных задач, комбинирующий переборный и градиентный методы. Механизмы скрещивания и мутации реализуют переборную часть метода, а отбор лучших решений – градиентный спуск.

### Программная реализация и экспериментальные исследования

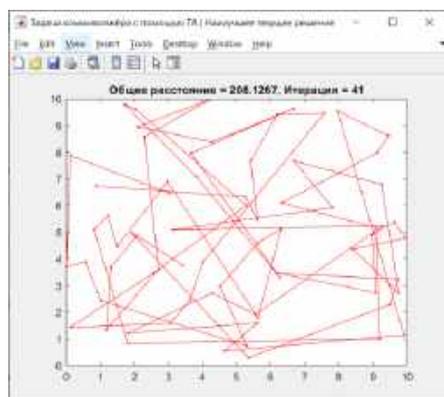
Основная особенность ГА состоит в том, что анализируется не одно решение, а некоторое подмножество квазиоптимальных решений (маршрутов), называемых хромосомами и состоящие из генов (городов). Это подмножество носит название «популяция». На этапе кодирования решения задачи коммивояжера хромосома представляется в виде последовательности городов, составляющих маршрут [8-10]. Мутацией является

изменение одного города в составленном маршруте. В данной реализации начальная популяция формируется случайным образом. После формирования начальной популяции, осуществляется процесс синтеза новых решений (поколений) задачи посредством кроссовера и мутации. Исходными данными для него являются хромосомы текущей популяции. Исследуемая в некоторый момент времени популяция называется текущей. В начале работы алгоритма текущая популяция совпадает с начальной. После скрещивания и мутации размер популяции увеличивается. Поэтому для последующих преобразований необходимо сократить число хромосом текущей популяции, выполнив отбор (селекцию). В текущей популяции, состоящей из родителей и потомков, производится отбор лучших решений, т.е. хромосом с наилучшим значением fitness-функции (целевой функции). Эта функция показывает, насколько исследуемая хромосома близка к оптимальному решению. Для текущей популяции повторяются все описанные процедуры. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет обработано заданное число поколений. При этом каждая последующая популяция должна быть лучше, чем предыдущая. Решению задачи соответствует хромосома с наилучшим значением fitness-функции, а критерием является наикратчайший [11-13].

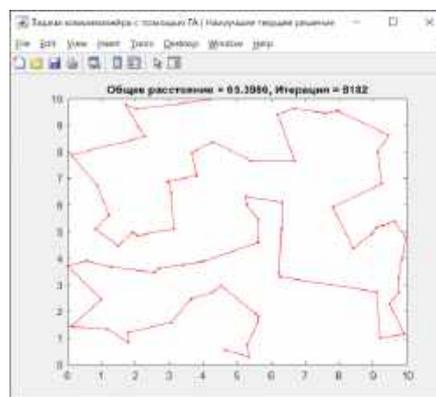
Экспериментальные исследования при программной реализации модифицированного ГА состояли из следующих этапов:

1. Исследовать зависимость быстродействия ГА и требуемой памяти от количества городов.
2. Получить зависимость быстродействия алгоритма и требуемой памяти от значения общих параметров ГА, таких как: размер начальной популяции (количество хромосом), вероятность мутации, количество итераций (поколений).

На рис. 2 представлены результаты тестирования работы ГА на бенчмарке из 70 городов в среде Matlab 2021a. Промежуточный результат показывает найденный маршрут на 41-й итерации (рис. 2а). На рис. 2б представлен итоговый результат работы ГА, который показывает сходимости алгоритма на тестовой выборке – оптимальное решение найдено, наименьший путь между указанными городами найден на 8182-й итерации за 11,9 секунды.



а) промежуточный результат (41-я итерация)



б) итоговый результат алгоритма (8182-я итерация)

Рис. 2. Результаты работы генетического алгоритма для решения задачи коммивояжера для 70 городов

На рис. 3 представлены характеристики работы ГА: расположение городов, матрица расстояний между городами и общее расстояние для наиболее оптимального решения.

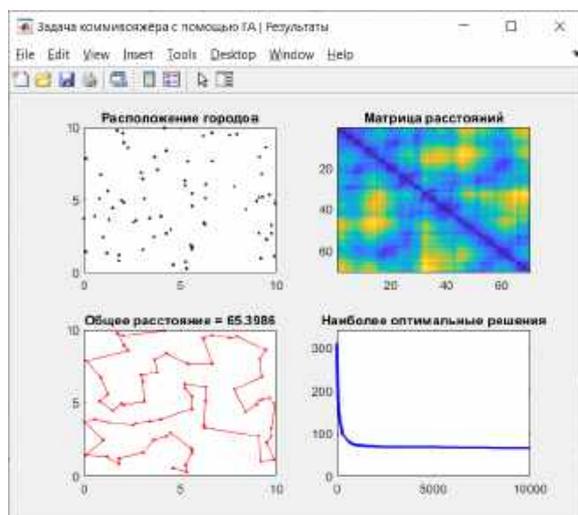


Рис. 3. Расположение городов и матрица расстояний

Полученные результаты тестирования ГА на бенчмарке показывают высокую эффективность применения ГА для решения задачи коммивояжера, оптимальное решение для 70 городов найдено за 11,9 секунды. При количестве городов больше 66 традиционные алгоритмы, используя метод полного перебора, не могут найти оптимальное решение в связи с высокой вычислительной сложностью.

Решение задачи коммивояжера реализовано в виде программы в среде MS Visual Studio 2022 на языке Visual C#. Главное окно программы реализовано с возможностью загрузки географической карты и настройкой основных характеристик ГА (выбор количества хромосом, вероятность мутации, количество итераций). На рис. 4 представлен промежуточный результат поиска оптимального пути по указанным 15 городам на карте Краснодарского края (города на карте задаются координатами). Промежуточный результат показывает соединительными линиями последовательность городов в найденном пути. Длина пути между городами на карте составила 2636 пикселей.

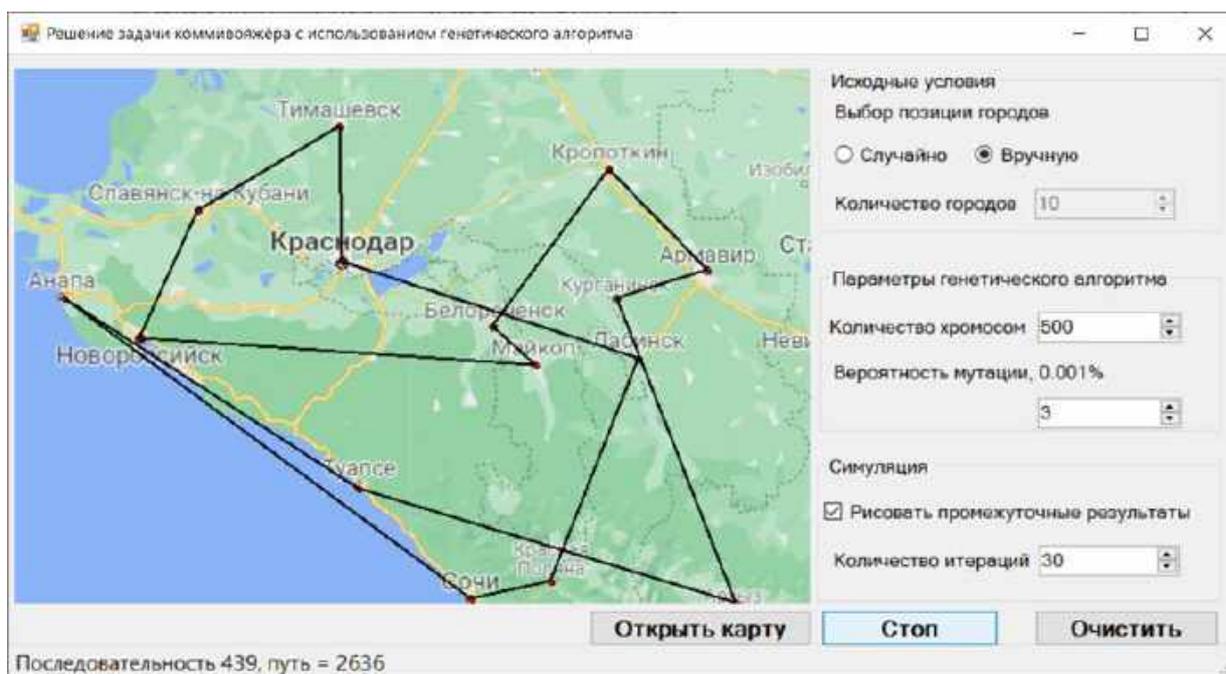


Рис. 4. Промежуточный результат поиска оптимального пути по указанным городам на карте Краснодарского края

На рис. 6 представлен итоговый результат поиска оптимального пути по указанным городам на карте. Длина наиболее оптимального (наикратчайшего)

пути составила 1665 пикселей. Условием останова для ГА является количество итераций.

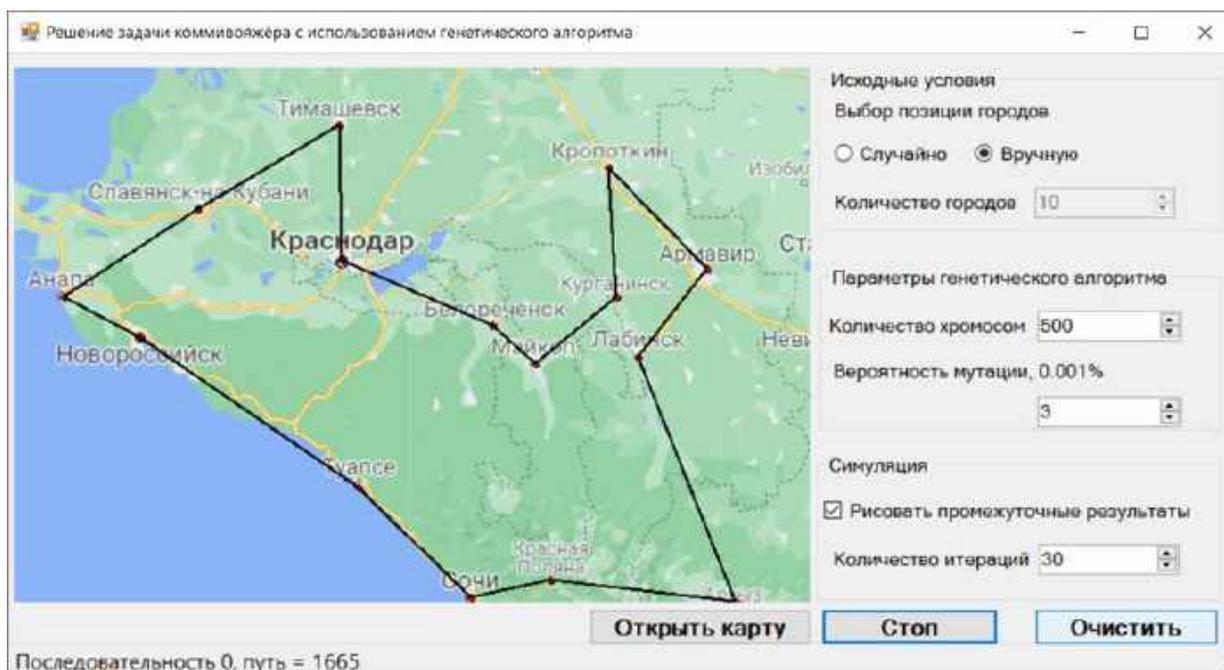


Рис. 5. Итоговый результат поиска оптимального пути по указанным городам на карте Краснодарского края

Фрагмент листинга разработанной программы на языке Visual C# с комментариями приведён ниже.

```
private void StartSimulation(Object obj)
{
    if (radioButton1.Checked) PopulateArea();
    //отобразить список городов на карте
    DrawCityList();
    CreateRoadWays();
    // создать линии, соединяющие города
    int i = 0;
    while (!interrupt_sim && (i !=
numericUpDown4.Value))
// выполнять цикл до указанного количества
// итераций или при нажатии на кнопку «Стоп»
    {
        // вызов процедуры скрещивания
        DoCrossover();
        // вызов процедуры мутации
        DoMutation();
        KillTheWeakest();
        // удаление из популяции наименее
        // приспособленных хромосом
        if (interrupt_sim) { break; }
        ++i;
    }
// если нажата кнопка «Стоп»
// прервать работу ГА
}
if (checkBox1.Checked)
```

```
{
// если выбраны города случайным образом
cityImage = null;
// очистить отображение городов
DrawCityList();
// отобразить новый список городов
}
DrawRoadWay();
// отобразить линии, соединяющие города
string name = "Старт";
if (button1.InvokeRequired)
{
// изменение надписи кнопки «Старт» на «Стоп»
button1.Invoke(new MethodInvoker(delegate {
button1.Text = name; }));
interrupt_sim = true;
// остановка работы ГА
}
}
```

Практическое применение задачи коммивояжера с использованием ГА может быть использовано при составлении оптимального маршрута для развоза товаров по заданным точкам, в таких компаниях, как OZON (Ozon Holdings PLC), ООО «Вайлдберриз», ООО «Купишуз», розничная сеть «Магнит» акционерное общество «Тандер». На рис. 6 представлен результат поиска оптимального пути по указанным пунктам самовывоза OZON в г. Новороссийске.

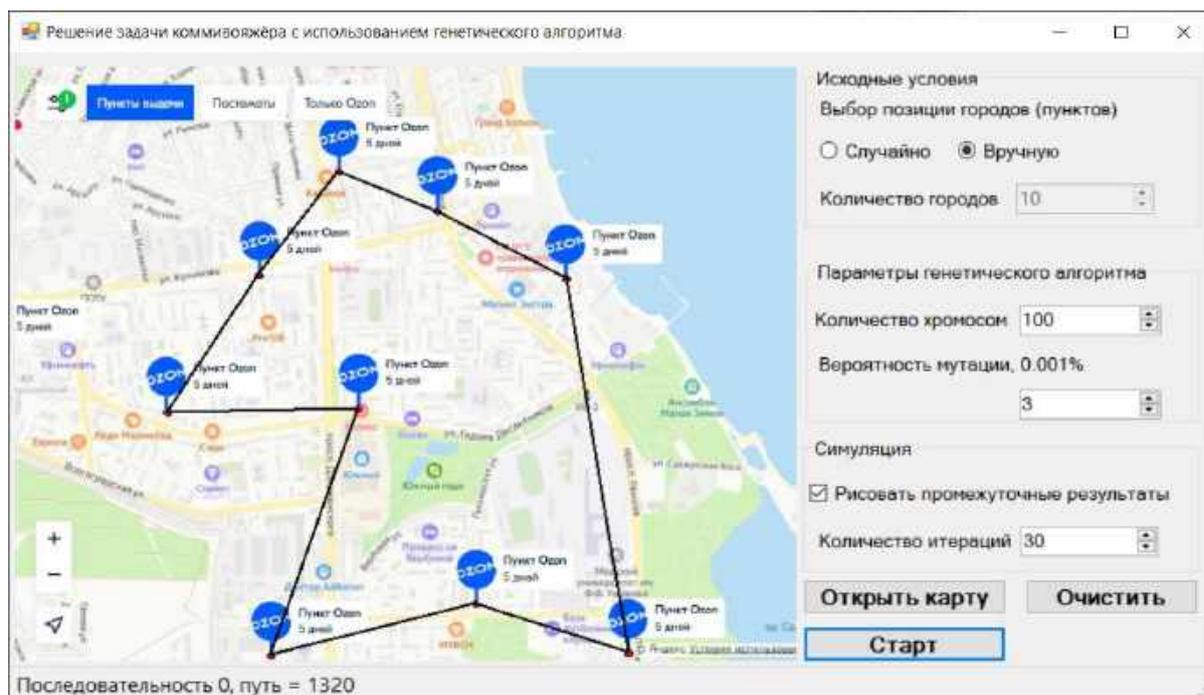


Рис. 6. Итоговый результат поиска оптимального пути по указанным пунктам

### Заключение

Генетические алгоритмы являются частью более общей группы методов, называемой эволюционные вычисления, которые, как и любые стохастические методы, не гарантируют нахождение глобального оптимума, однако эти методы позволяют найти совокупность приемлемых решений за ограниченное время. Для решения трансвычислительных задач ГА показывают высокую эффективность и обладают следующими преимуществами: параллельная обработка множества альтернативных решений (параллелизм), достаточно широкое пространство решений, лёгкость обнаружения глобального максимума на сложных функциях, высокая скорость работы на больших пространствах поиска.

Рассмотрено решение NP-трудной задачи коммивояжера с применением ГА, кодирование хромосом реализовано в виде последовательности городов, составляющих маршрут. Мутацией в хромосоме является изменение одного города (гена) в составленном маршруте. Разработан модифицированный ГА и программа поиска наименьшего пути по заданным пунктам назначения. Получены результаты тестирования на бенчмарке для 70 пунктов назначения в среде Matlab 2021a, наименьший путь найден на 8182-й итерации за 11,9 секунды. Полученный результат работы ГА показывает сходимость алгоритма на тестовой выборке и высокую эффективность применения ГА для решения задачи коммивояжера.

Решение задачи коммивояжера также реализовано в виде программы в среде MS Visual Studio 2022 на языке Visual C# с возможностью загрузки географической карты и настройкой основных характеристик ГА (выбор количества хромосом, вероятность мутации, количество итераций). В разработанном модифицированном ГА при реализации скрещивания предлагается два варианта: одноточечный или двухточечный кроссовер. Особенностью разработанного ГА является способность эффективно работать на популяциях с малым числом хромосом, что уменьшает вычислительную сложность алгоритма.

Получены результаты поиска оптимального маршрута по указанным 15 городам на карте Краснодарского края, а также по указанным пунктам в г. Новороссийске. Практическое применение задачи коммивояжера с использованием ГА может быть использовано при составлении оптимального маршрута для развоза товаров по заданным точкам, в таких компаниях, как OZON (Ozon Holdings PLC), ООО «Вайлдберриз», ООО «Купишуз», розничная сеть «Магнит» акционерное общество «Тандер». Получен результат поиска оптимального пути по указанным пунктам самовывоза OZON в г. Новороссийске. Результаты поиска наименьшего пути на карте показывают высокую эффективность применения ГА для решения транспортных и логистических задач.

### Литература

1. Курейчик В.В. Решение задач о коммивояжере методами эволюционного моделирования. Известия ТРТУ. 2003. № 2 (31). С. 94-102.
2. Студеникин Д.Е., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В., Модина М.А. Динамическое формирование коридора безопасности при планировании маршрута движения судна. Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 4. № 2 (53). С. 128-131.

3. Studenikin D.E., Kondratev S.I., Javuktsyan M.L. Some aspects of vessel's movement in congested waters analysis for preliminary route planning. Эксплуатация морского транспорта. 2019. № 3 (92). С. 30-34.
4. Кондратьев С.И., Астреин В.В., Боран-Кешишьян А.Л. Методика рефлексивной оценки эффективности ИСППР безопасности судовождения в условиях переходного периода. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1 (41). С. 156-161.
5. Епихин А.И., Игнатенко А.В., Студеникин Д.Е., Хекерт Е.В. Основные тренды внедрения технологий искусственного интеллекта в управлении морскими автономными надводными судами. Эксплуатация морского транспорта. 2021. № 1 (98). С. 88-96.
6. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.
7. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Анализ и состояние задачи маршрутизации автотранспорта. Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 4 (52). С. 73-77.
8. Полковникова Н.А., Курейчик В.М. Многокритериальная оптимизация на основе эволюционных алгоритмов. Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 2 (163). С. 149-162.
9. Полковникова Н.А. Многокритериальная оптимизация параметров топливоподачи в главных судовых дизелях с использованием эволюционных алгоритмов. Эксплуатация морского транспорта. 2014. № 1 (73). С. 58-68.
10. Курейчик В.М., Логунова Ю.А. Гибридный подход для решения задачи коммивояжера с помощью облачных вычислений в сети интернет. Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 5 (207). С. 25-33.
11. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Использование роевого интеллекта в решении NP-трудных задач. Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 7 (120). С. 30-36.
12. Полупанова Е.Е., Поляков А.С. Популяционный алгоритм решения задачи коммивояжера. Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2021. Т. 17. № 2. С. 324-333.
13. Юрин Д.А., Чекал Е.Г. Онлайн-сервис для решения задачи коммивояжера с использованием генетического алгоритма и Google API. Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии. 2018. № 1. С. 109-122.

#### References

1. Kureichik V.V. Reshenie zadach o kommivoyazhere metodami evolyutsionnogo modelirovaniya [Solving traveling salesman problems by methods of evolutionary simulation]. Izvestiya TRTU. 2003. № 2 (31). S. 94-102.
2. Studenikin D.E., Kondrat'ev S.I., Hekert E.V., Modina M.A. Dinamicheskoe formirovanie koridora bezopasnosti pri planirovanii marshruta dvizheniya sudna [Dynamic formation of a safety corridor during preliminary vessel route planning]. Morskie intellektual'nye tehnologii. 2021. T. 4. № 2 (53). S. 128-131.
3. Studenikin D.E., Kondratev S.I., Javuktsyan M.L. Some aspects of vessel's movement in congested waters analysis for preliminary route planning. Jekspluatatsija morskogo transporta. 2019. № 3 (92). S. 30-34.
4. Kondrat'ev S.I., Astrein V.V., Boran-Keshish'jan A.L. Metodika reflektivnoj ocenki jeffektivnosti IS-PPR bezopasnosti sudovozhdeniya v uslovijah perehodnogo perioda. Morskie intellektual'nye tehnologii [The method of reflexive evaluation of efficiency of shipping safety in the conditions of the transition period]. 2018. № 3-1 (41). S. 156-161.
5. Epihin A.I., Ignatenko A.V., Studenikin D.E., Hekert E.V. Osnovnye trendy vnedreniya tehnologij iskusstvennogo intellekta v upravlenii morskimi avtonomnymi nadvodnymi sudami [Trends, prospects and technologies for modern and cutting-edge power plants within maritime industry incorporating aspects of autonomous shipping]. Jekspluatatsija morskogo transporta. 2021. № 1 (98). S. 88-96.
6. Kureichik V.V., Kureichik V.M., Rodzin S.I. Teoriya jevoljucionnyh vychislenij [Theory of evolutionary computing]. – М.: Физматлит, 2012. – 260 s.
7. Kureichik V.M., Kazharov A.A. Analiz i sostojanie zadachi marshrutizacii avtotransporta [The analysis and status of the transport routing problem]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija. 2013. № 4 (52). S. 73-77.
8. Polkovnikova N.A., Kureichik V.M. Mnogokriterial'naja optimizatsija na osnove jevoljucionnyh algoritmov [Multiobjective optimization on the base of evolutionary algorithms]. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2015. № 2 (163). S. 149-162.
9. Polkovnikova N.A. Mnogokriterial'naja optimizatsija parametrov toplivopodachi v glavnyh sudovyh dizeljah s ispol'zovaniem jevoljucionnyh algoritmov [Multiobjective optimization of fuel supply parameters in main marine diesel engines using evolutionary algorithms]. Jekspluatatsija morskogo transporta. 2014. № 1 (73). S. 58-68.
10. Kureichik V.M., Logunova Ju.A. Gibridnyj podhod dlja reshenija zadachi kommivoyazhjera s pomoshh'ju oblachnyh vychislenij v seti internet [The hybrid approach for the travelling salesman problem solving using cloud computing in the Internet]. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2019. № 5 (207). S. 25-33.
11. Kureichik V.M., Kazharov A.A. Ispol'zovanie roevogo intellekta v reshenii NP-trudnyh zadach [Swarm intelligence using for NP-tasks solving]. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2011. № 7 (120). S. 30-36.
12. Polupanova E.E., Poljakov A.S. Populjacionnyj algoritm reshenija zadachi kommivoyazhjera [Population-based algorithm for solving the traveling salesman problem]. Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. 2021. T. 17. № 2. S. 324-333.
13. Jurin D.A., Chekal E.G. Onlajn-servis dlja reshenija zadachi kommivoyazhjera s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma i Google API [Online service for solving the traveling salesman problem using a genetic algorithm and Google API]. Uchenye zapiski UIGU. Serija: Matematika i informacionnye tehnologii. 2018. № 1. S. 109-122.

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

**Наталья Анатольевна Полковникова**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационные технологии», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru

**Natalia A. Polkovnikova**, Ph.D. (Eng), assistant professor of Radio engineering and information technologies department, Admiral F.F. Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, Lenin's avenue, 93, e-mail: natalia-polkovnikova@mail.ru

**Анатолий Карпович Полковников**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация судовых механических установок», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: polkov5@mail.ru

**Anatoly K. Polkovnikov**, Ph.D. (Eng), assistant professor of Operation of ship mechanical installations department, Admiral F.F. Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, Lenin's avenue, 93, e-mail: polkov5@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.03.2022

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.07.2022

Принята к публикации/accepted for publication 10.08.2022

Научная статья

УДК 621.384

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.035>

## Планирование поведения автономных интеллектуальных роботов в условиях с высоким уровнем априорной неопределенности

Мелехин В.Б.<sup>1</sup> pashka1602@rambler.ru, , Хачумов М.В.<sup>2,3,4</sup> khmike@inbox.ru

<sup>1</sup>Дагестанский государственный технический университет, <sup>2</sup>Институт программных систем им. А.К.Айламазяна РАН, <sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,

<sup>4</sup>Российский университет дружбы народов

**Аннотация.** Проведен краткий анализ проблем, связанных с организацией планирования поведения автономных интеллектуальных роботов в априори неопределенных условиях проблемной среды. Введено и определено понятие “высокий уровень априорной неопределенности” условий функционирования робота. Сформулированы основные особенности планирования целенаправленного поведения автономных интеллектуальных роботов в проблемных средах с высоким уровнем априорной неопределенности.

Предложена модель представления и обработки знаний типа справочника “Запросы и ответы”, позволяющая интеллектуальному роботу определять действия, необходимые для устранения двух основных видов различий между текущей и целевой ситуациями проблемной среды с высоким уровнем априорной неопределенности. Первый вид таких различий связан с изменением значений отношений пространства состояний между определенными объектами проблемной среды, а также роботом и данными объектами, входящими в структуру заданной цели поведения. Второй вид различий определяется необходимостью перевода находящихся в проблемной среде объектов из их текущего состояния в требуемое состояние, определяемое заданной роботу целью поведения.

Разработаны эвристические правила, позволяющие установить порядок устранения различий между исходной и целевой ситуациями проблемной среды. Использование данных правил обеспечивает автономному интеллектуальному роботу возможность ранжировать порядок отработки действий для устранения данных различий и таким образом автоматически построить план предстоящей целенаправленной деятельности.

**Ключевые слова:** автономный интеллектуальный робот, проблемная среда, высокий уровень неопределенности, устранение различий, результативные действия, план поведения.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056/>

**Для цитирования:** Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения автономных интеллектуальных роботов в условиях с высоким уровнем априорной неопределенности. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 274—281.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.035>

## Planning the behavior of autonomous intelligent robots under conditions with a high level of a priori uncertainty

Vladimir B. Melekhin<sup>1</sup> pashka1602@rambler.ru, Mikhail V. Khachumov<sup>1,2,3</sup> khmike@inbox.ru

<sup>1</sup>Dagestan State Technical University, Russian Federation, <sup>2</sup>Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Russian Federation, <sup>3</sup>Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Russian Federation, <sup>4</sup>Peoples' Friendship University of Russia, Russian Federation

**Abstract.** A brief analysis of the problems associated with the organization of planning the behavior of autonomous intelligent robots in a priori undescribed conditions of the problematic environment is carried out. The concept of “high level of a priori uncertainty” for the operating conditions of the robot is introduced and defined. The main features of planning the goal-seeking behavior of autonomous intelligent robots in problematic environments with a high level of uncertainty of operating conditions are formulated.

A model for the representation and processing of knowledge such as the “Requests and Answers” reference book is proposed, which allows an intelligent robot to determine the actions necessary to eliminate two main types of differences between the current and goal situations of a problematic environment with a high level of a priori uncertainty. The first type of such differences is associated with a change in the values of state space relations between certain objects of the problematic environment, as well as the robot and these objects that are part of the structure of a given goal. The second type of differences is determined by the need to transfer objects in the problematic environment from their current state to the required state, determined by the goal of behavior given to the robot.

Heuristic rules have been developed to establish the procedure for eliminating differences between the initial and target situations of the problematic environment. The use of these rules provides an autonomous intelligent robot with the ability to rank the order of actions to eliminate these differences and thus automatically form a plan for the upcoming goal-seeking activity.

**Key words:** autonomous intelligent robot, problematic environment, high level of uncertainty, elimination of differences, effective actions, behavior plan.

**Financial Support:** The study was financially supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056/>

**For citation:** Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov, Planning the behavior of autonomous intelligent robots under conditions with a high level of a priori uncertainty. Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 274—281.

### Введение

Создание автономных интеллектуальных роботов (АИР) различного назначения, способных автоматически планировать целенаправленную деятельность в сложных проблемных средах (ПС) с высоким уровнем априорной неопределенности условий функционирования, является актуальной проблемой искусственного интеллекта.

В общем случае в процессе решения сложных проблем, связанных с реализацией различного вида деятельности, АИР может столкнуться с необходимостью планирования следующих видов целенаправленного поведения:

- маршрутизации перемещений в условиях с априори неопределенными координатами находящихся в ПС препятствий или при отсутствии формального описания карты местности;

- построения кортежа действий, обработка которых позволяет выполнить преобразование текущей ситуации ПС в заданную целевую ситуацию.

В первом случае в настоящее время для планирования целенаправленного поведения в априори неопределенных ПС достаточно эффективно используются Slam методы [1, 2] и методы, основанные на построении графов “видимости” [3, 4].

Во втором случае задача планирования поведения сводится к определению различий между текущей и целевой ситуациями ПС и синтезу последовательности действий, обработка которой обеспечивает их устранение. Следует отметить, что известные модели представления и обработки знаний АИР позволяют найти решение данной задачи только при подробном описании закономерностей целенаправленного преобразования текущих условий функционирования [5, 6]. Однако для реальных проблемных сред, построение подробной формальной модели закономерностей ПС, обеспечивающей АИР возможность планирования целенаправленного поведения на основе известных методов вывода решений, на практике не представляется возможным [7]. Таким образом, возникает необходимость в разработке модели представления и обработки знаний безотносительно к конкретной предметной области [8], позволяющей АИР решать второй тип задач планирования целенаправленной деятельности в априори неопределенных условиях ПС.

В настоящей статье предлагается один из подходов позволяющих АИР решать задачи, связанные с необходимостью преобразования текущей ситуации в целевую ситуацию ПС с высоким уровнем априорной неопределенности условий функционирования.

### Постановка задачи

Рассмотрим АИР как подвижную систему, оснащенный манипулятором и ориентированную на решение определенного класса задач. Данная система состоит из [9]: сенсорной, решающей и моторной подсистем. Манипулятор предназначен

для отработки АИР различных действий над находящимися в ПС объектами с целью перевода ее текущей ситуации в целевую ситуацию. Сенсорная подсистема включает дальномер и модуль технического зрения, обеспечивающие решающую подсистему АИР данными, необходимыми для проведения анализа условий функционирования и результатов отработки различных действий. Решающая подсистема АИР состоит из базы знаний, в которой хранится модель их представления и интеллектуального решателя задач предназначенного для автоматического планирования целенаправленного поведения, связанного с достижением заданной роботу цели. Моторная подсистема служит для выполнения АИР различных действий, связанных с перемещением в ПС, и в зависимости от его назначения может иметь гусеничный или колесный ход.

Таким образом, АИР можно охарактеризовать множеством обрабатываемых действий

$B = \{b_{i_1}\}, i_1 = \overline{1, n_1}$ , например, переставить объект, подойти к объекту ПС и т.д., а также способностью распознавать объекты проблемной среды

$O = \{o_{i_2}(X_{i_2})\}, i_2 = \overline{1, n_2}$ , которые он может при необходимости использовать в процессе своей целенаправленной деятельности, где  $X_{i_2}$  – множество признаков, определяющих  $i_2$  объект ПС.

В общем же случае функциональные возможности и назначение АИР определяются заданной моделью представления знаний и процедурами автоматического планирования поведения в различных условиях ПС.

Проблемную среду можно определить множеством находящихся в ней объектов  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ , а также семантическими

отношениями  $R = \{r_{i_3}\}, i_3 = \overline{1, n_3}$  [10], которые выполняются в ПС между данными объектами и АИР. В целом же ПС характеризуется сложившейся в ней текущей ситуацией  $S_{i_4} \in S, i_4 = \overline{1, n_4}$ , содержание которой зависит от состояния находящихся в среде объектов и значений отношений  $r_{i_3} \in R$  между ними.

Цель поведения АИР формулируется оператором, контролирующим его деятельность, в декларативной форме представления в виде фрагмента  $\Delta S_{i_5}^* \subseteq S_{i_4}^*, i_5 = \overline{1, n_5}$  целевой ситуации ПС  $S_{i_4}^* \in S$ .

Фрагмент  $\Delta S_{i_4} \subseteq S_{i_4}$  текущей ситуации  $S_{i_4}$ , определяющий участок ПС на котором предстоит действовать АИР, строится по заданной цели

поведения  $\Delta S_{i_5}^*$  следующим образом. Все активные вершины, определяемые слотами  $o_{i_6}^*(X_{i_6}^*)$  в нечеткой семантической сети  $G_{i_5}^*$ , соответствующей заданной цели поведения  $\Delta S_{i_5}^*$ , помечаются находящимися в ПС объектами  $o_{i_2}(X_{i_2})$ , для которых выполняется условие  $X_{i_6}^* \subseteq X_{i_2}$ . Затем ребра  $e_{j_2}^{i_5} \in E_{i_5}$  инцидентные этим вершинам в сети  $G_{i_5}$ , соответствующей текущей подситуации ПС  $\Delta S_{i_4}$ , определяются найденными АИР количественными оценками  $r_{i_3}^*$  отношений  $r_{i_3} \in R$ , которые выполняются в проблемной среде между соответствующими объектами и АИР.

Это позволяет роботу выявить имеющиеся между текущей и целевой ситуациями ПС различия согласно следующему правилу, не привязанным к конкретным условиям ПС.

1. Между значениями одноименного отношения в подситуациях ПС  $\Delta S_{i_4}$  и  $\Delta S_{i_5}^*$  имеется различие, если для пометок структурно эквивалентных ребер, соответствующих этому отношению в семантических сетях  $G_{i_5}$  и  $G_{i_5}^*$ , выполняется условие  $r_{i_3}^* \notin (r_{j_3}^*, r_{j_3+1}^*)$ , где  $r_{i_3}^*, (r_{j_3}^*, r_{j_3+1}^*)$  – количественная оценка отношения и подинтервал численных значений термина  $T_{j_3}^*(r_{i_3}^*)$ , которыми помечены структурно эквивалентные ребра, соответственно в сетях  $G_{i_5}$  и  $G_{i_5}^*$ .

2. Между состоянием одноименных объектов в подситуациях ПС  $\Delta S_{i_4}$  и  $\Delta S_{i_5}^*$  имеется различие, если для пометок структурно эквивалентных вершин в соответствующих им семантических сетях  $G_{i_5}$  и  $G_{i_5}^*$ , выполняется условие  $o_{i_2}^* \neq o_{i_6}^{**}$ .

Следует отметить, что такой подход к построению текущей ситуации ПС  $S_{i_4} \in S$ , с одной стороны, позволяет АИР определить, достижима или нет в текущих условиях ПС заданная цель поведения. Робот принимает решение о том, что цель поведения  $\Delta S_{i_5}^*$  является не достижимой в текущих условиях функционирования, если в ПС отсутствует объект  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ , который удовлетворяет требованиям, хотя бы одного слота  $o_{i_6}^*(X_{i_6}^*)$ , входящего в структуру семантической сети  $G_{i_5}^*$ . С другой стороны, это позволяет выделить в ПС участок, на котором АИР предстоит функционировать для достижения заданной цели поведения.

При такой форме представления заданной роботу цели, планирование целенаправленного поведения АИР сводится к автоматическому построению упорядоченной последовательности действий

$b_{i_1} \in B$ , обработка которых позволяет устранить все различия между подситуациями ПС  $\Delta S_{i_4}^*$  и  $\Delta S_{i_4}$ , которые могут быть следующих видов:

– по значениям  $r_{i_3}^*$  отношений  $r_{i_3} \in R$ , в основном, пространства состояний между различными объектами ПС и АИР, входящими в структуру формального описания заданной роботу цели поведения  $\Delta S_{i_5}^* \subseteq S_{i_4}^*$ . В общем случае указанного вида отношения определяются следующими тройками  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^*o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  и  $o_{i_2}(X_{i_2})r_{i_3}^*$  АИР, где  $r_{i_3}^*$  – количественная оценка отношения  $r_{i_3} \in R$ , полученная АИР в ПС;

– по состоянию одноименных объектов  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$  находящихся в ПС и входящих в структуру заданной АИР цели поведения.

При этом, под априори неопределенной проблемной средой с высоким уровнем неопределенности следует понимать такие условия функционирования АИР, когда:

– априори неопределены закономерности результативной обработки действий  $b_{i_1} \in B$ ;

– не известен порядок устранения различий, связанный с преобразованием текущей ситуации  $S_{i_4}$  ПС в заданную целевую ситуацию  $S_{i_4}^*$ .

Следовательно, опираясь на характеристики АИР, ПС и способ определения формулируемых роботу целей поведения  $\Delta S_{i_5}^*$ , требуется разработать модель представления и обработки знаний, а также метод вывода решений, который позволяет роботу автоматически генерировать план целенаправленного поведения, обеспечивающий преобразование текущей ситуации ПС  $S_{i_4} \in S$  в ее целевую ситуацию  $S_{i_4}^* \in S$  в различных условиях функционирования с высоким уровнем априорной неопределенности.

### Модель представления и обработки знаний АИР

Для разработки модели представления знаний безотносительно к конкретной предметной области, позволяющей АИР выявлять результативные действия, обработка которых обеспечивает достижение в текущих условиях ПС заданной цели поведения, будем исходить из следующих соображений.

1. Для определения результативных действий в условиях с высоким уровнем априорной неопределенности АИР следует, практически, получить ответ на следующие запросы, генерируемые подсистемой вывода решений в процессе планирования поведения:

– какие лучше всего, и в какой последовательности, требуется обработать действия  $b_{i_1} \in B$  для устранения наблюдаемых между исходной и целевой ситуациями различий путем целенаправленного изменения соответствующих им значений  $r_{i_3}^*$  отношений  $r_{i_3} \in R$  между различными

парами соседних объектов  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ , находящихся в ПС ?;

– обработка, каких действий  $b_{i_1} \in B$  и в какой последовательности позволяет перевести заданные объекты ПС  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$  из текущих состояний  $o_{i_2}^*$  в требуемые состояния  $o_{i_2}^{**}$ , определяемые сформулированной АИР целью поведения  $\Delta S_{i_5}^*$  ?;

– в какой последовательности следует обработать выявленные действия для преобразования текущей подситуации ПС  $\Delta S_{i_4}$  в ее целевую ситуацию  $\Delta S_{i_4}^*$  таким образом, чтобы обработка каждого текущего действия не искажала результаты полученные АИР в процессе выполнения действий, на предыдущих этапах функционирования ?

Кроме того, обработка каждого выявленного действия  $b_{i_1} \in B$  должна быть только результативной, что может быть нарушено при неправильной очередности их выполнения. Например, пусть АИР требуется достать объект, находящийся в ПС за пределами рабочей зоны его манипулятора по расстоянию и высоте (классическая тестовая задача искусственного интеллекта “Обезьяна и банан”). Тогда, если АИР первым обработает действие «подойти к объекту» для устранения различия по расстоянию между его местоположением и заданным объектом, то это действие окажется не результативным, так как в этом случае робот окажется не способным достать высоко расположенный объект.

2. После определения действий, позволяющих устранить все различия между подситуациями  $\Delta S_{i_4}^*$  и  $\Delta S_{i_4}$ , автоматическое планирование поведения АИР, в условиях с высоким уровнем неопределенности, сводится к определению порядка устранения этих различий и к построению в соответствии с этим порядком упорядоченной последовательности кортежей установленных действий  $b_{i_1} \in B$ , выполнение которых в полученной последовательности обеспечивает достижение заданной цели поведения  $\Delta S_{i_4}^*$ .

Таким образом, для планирования целенаправленного поведения АИР в условиях с высоким уровнем априорной неопределенности, требуется разработка модели их представления и обработки типа справочника “Запросы и ответы”. Такая модель представления знаний на каждый запрос “как можно устранить различие по значению отношения  $r_{i_3} \in R$ ”, сформулированный в интеллектуальном решателе задач АИР по содержанию одного из различий между подситуациями ПС  $\Delta S_{i_4}^*$  и  $\Delta S_{i_4}$ , должна обеспечивать ответ “для этого требуется обработать кортеж следующих действий  $b_{i_1}^1, \dots, b_{i_1}^k, \dots, b_{i_1}^z \in B$ ”.

Для формального же представления безотносительно к конкретной предметной области

формулируемых АИР целей поведения  $\Delta S_{i_5}^*$ , целесообразно использовать активные нечеткие семантические сети [11], представляющие собой нечетко помеченный граф  $G_{i_5} = (v_0, V_{i_5}, E_{i_5})$ , где  $v_0$  – базовая вершина сети, помеченная АИР;

$V_{i_5} = \{v_{j_1}^{i_5}\}$ ,  $j_1 = \overline{1, m_1}$  и  $E_{i_5} = \{e_{j_2}^{i_5}\}$ ,  $j_2 = \overline{1, m_2}$  – соответственно множества вершин и ребер. Вершины  $v_{j_1}^{i_5} \in V_{i_5}$  в сети  $G_{i_5}$  определяются слотами  $\langle o_{i_6}^{**}, o_{i_6}^*(X_{i_6}^*) \rangle$ , где  $o_{i_6}^*(X_{i_6}^*) \in O^*$ ,

$O^* = \{o_{i_6}^*(X_{i_6}^*)\}$ ,  $i_6 = \overline{1, n_6}$  – множество слотов, которые в текущих условиях функционирования АИР, согласно принятому условию, помечаются находящимися в ПС объектами  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ .

Например, вершина  $v_{j_1}^{i_5} \in V_{i_5}$ , определяемая слотом  $o_{i_6}^*(X_{i_6}^*)$  в сети  $G_{i_5}$ , может быть помечена находящимся в ПС объектом  $o_{i_2}(X_{i_2})$ , если он удовлетворяют следующему условию  $X_{i_7}^* \subseteq X_{i_2}$ .

Ребра  $e_{j_2}^{i_5} \in E_{i_5}$ , в сети  $G_{i_5}$  определяются следующими тройками

$\langle T_{j_3}^*(r_{i_3}), (r_{j_3}^*, r_{j_3+1}^*) \rangle$ ,  $j_3 = \overline{1, 5}$ , где  $T_{j_3}^*(r_{i_3})$  – терм лингвистической переменной [12] с названием, совпадающим с наименованием отношения  $r_{i_3} \in R$ , выполняющегося в ПС между двумя объектами или объектом и АИР, которыми помечены вершины инцидентных этим ребрам;  $(r_{j_3}^*, r_{j_3+1}^*)$  – соответственно нижняя и верхняя границы подинтервала численных значений термина  $T_{j_3}^*(r_{i_3})$  на шкале количественных оценок лингвистической переменной.

В общем же случае модель представления и обработки знаний типа “справочник” состоит из типовых элементов, имеющих следующее содержание и структуру. Для определения действий позволяющих устранять различия типа “отношения” между объектами ПС или между объектом среда и АИР используются следующие типовые элементы представления знаний.

1. Пусть АИР для достижения заданной цели  $\Delta S_{i_5}^*$  требуется изменить значение  $r_{i_3}^*$  отношения  $r_{i_3} \in R$  между заданными объектами ПС  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1) \in O$  и  $o_{i_2}^2(X_{i_2}^2) \in O$  на его значение, равное  $r_{i_3}^{**}$ . Тогда для определения кортежа

действий  $B_{j_4}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**}) \in B^*$ ,  $j_4 = \overline{1, m_4}$ , обработка которых позволяет устранить данное различие, из модели представления знаний в решающую систему АИР по запросу “требуется изменить значение отношения  $r_{i_3} \in R$ ” выбирается следующее имплекативное решающее правило:

«Возможные допустимые варианты изменения значений отношения  $r_{i_3}$  между объектами ПС: если отношения  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^*o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  и  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^{**}o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$ , соответственно, удовлетворяют требованиям слотов  $(o_{i_6}^{*1}(X_{i_6}^{*1})T_{j_3}^*(r_{i_3}^*)o_{i_6}^{*2}(X_{i_6}^{*2}))$  и  $(o_{i_6}^{*1}(X_{i_6}^{*1})T_{j_3}^*(r_{i_3}^{**})o_{i_6}^{*2}(X_{i_6}^{*2}))$ , то необходимо обработать кортеж действий  $B_{j_4}^1(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$ , иначе,...

...если отношения  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^*o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  и  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^{**}o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$ , соответственно, удовлетворяют требованиям слотов  $(o_{i_6}^{*k_1}(X_{i_6}^{*k_1})T_{j_3}^*(r_{i_3}^*)o_{i_6}^{*k_1}(X_{i_6}^{*k_1}))$  и  $(o_{i_6}^{*k_1}(X_{i_6}^{*k_1})T_{j_3}^*(r_{i_3}^{**})o_{i_6}^{*k_1}(X_{i_6}^{*k_1}))$ , то следует обработать кортеж действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$  иначе,....,

...если отношения  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^*o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  и  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^{**}o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$ , соответственно, удовлетворяют требованиям слотов  $(o_{i_6}^{*m_4}(X_{i_6}^{*m_4})T_{j_3}^*(r_{i_3}^*)o_{i_6}^{*m_4}(X_{i_6}^{*m_4}))$  и  $(o_{i_6}^{*m_4}(X_{i_6}^{*m_4})T_{j_3}^*(r_{i_3}^{**})o_{i_6}^{*m_4}(X_{i_6}^{*m_4}))$ , то необходимо обработать кортеж действий  $B_{j_4}^{m_4}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$ »,

где, например, отношение  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^*o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  между заданными объектами в исходной подситуации ПС  $\Delta S_{i_4}$  удовлетворяет требованиям слота  $(o_{i_6}^{*1}(X_{i_6}^{*1})T_{j_3}^*(r_{i_3}^*)o_{i_6}^{*2}(X_{i_6}^{*2}))$ , если для него выполняются следующие условия:  $X_{i_6}^{*1} \subseteq X_{i_2}^1$ ,  $X_{i_6}^{*2} \subseteq X_{i_2}^2$  и  $r_{i_3}^* \in (r_{j_3}^*, r_{j_3}^{**})$ ;  $(r_{j_3}^*, r_{j_3}^{**})$  – подинтервал численных значений термина  $T_{j_3}^*$  на базовой шкале значений соответствующей лингвистической переменной [12];  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^{**}o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  – значение искомого отношения в целевой подситуации ПС  $\Delta S_{i_5}^*$ .

Следует отметить, что аналогичным образом строятся импликативные решающие правила, используемые роботом для выбора результативных действий в случае, когда требуется изменить значения отношений вида  $o_{i_2}(X_{i_2})r_{i_3}^*$  АИР.

Необходимо также отметить, что различные слоты  $o_{i_6}^{*k}(X_{i_6}^{*k})$ ,  $k_1 = \overline{1, m_4}$ , как правило,

«Как перевести объекты  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ , удовлетворяющие требованиям слота  $o_{i_6}^*(X_{i_6}^*)$ , из текущего

$o_{i_2}^*$  в заданное состояние  $o_{i_6}^{**}$ :

если подзадача определяется парой  $\langle o_{i_2}^{*1}, o_{i_6}^{**} \rangle$ , то обработать кортеж действий  $B_{j_5}^1$ , иначе,...

... если подзадача определяется парой  $\langle o_{i_2}^{*k_2}, o_{i_6}^{**} \rangle$ , то обработать кортеж действий  $B_{j_5}^{k_2}$ , иначе,...

...если подзадача определяется парой  $\langle o_{i_2}^{*m(i_2)}, o_{i_6}^{**} \rangle$ , то обработать кортеж действий  $B_{j_5}^{m(i_2)}$ »,

где  $m(i_2)$  – количество возможных допустимых состояний объекта  $o_{i_2}(X_{i_2})$ .

Таким образом, модель представления знаний, состоящая из приведенных выше импликативных решающих правил, заданных АИР с учетом его функционального назначения, позволяет решать задачи связанные с определением результативных действий, обеспечивающих возможность устранения отдельных различий между исходной  $\Delta S_{i_4}$  и целевой  $\Delta S_{i_5}^*$  подситуациями ПС с учетом

учитывают определенные по габаритным размерам и весу объекты ПС  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ , над которыми АИР для достижения цели необходимо обработать различные действия  $b_{i_1} \in B$ . Кроме того, кортежи действий  $B_{j_4}^k(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$ , в свою очередь, могут также содержать слоты  $o_{i_6}^*(X_{i_6}^*)$ , по которым АИР устанавливает объекты ПС необходимые ему в качестве инструмента, позволяющего обеспечить в ПС условия, требуемые для достижения текущей подцели поведения. Например, чтобы захватить заданный объект, находящийся за пределами рабочей зоны манипулятора по высоте, АИР требуется найти в ПС и использовать объект, на который он может влезть и таким образом обеспечить необходимую высоту своего местоположения в проблемной среде для захвата заданного объекта.

2. Рассмотрим случай, когда АИР для достижения цели следует изменить состояние находящихся в ПС объектов. Для устранения такого вида различий между подситуациями ПС  $\Delta S_{i_4}$  и  $\Delta S_{i_5}^*$  используются импликативные решающие правила следующего вида:

габаритных размеров и веса, находящихся в среде объектов.

### Эвристические правила ранжирования порядка отработки АИР выявленных кортежей действий

После выбора кортежей действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$  и  $B_{j_5}^{k_2}$ , выполнение которых позволяет устранить все различия между подситуациями ПС  $\Delta S_{i_4}$  и  $\Delta S_{i_5}^*$ ,

для построения плана целенаправленной деятельности АИР остается только установить порядок их результативной обработки. Метод такого упорядочивания полученных кортежей действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$  и  $B_{j_5}^{k_2}$  сводится к выполнению следующих операций в интеллектуальном решателе задач АИР.

1. Все различия, найденные между подситуациями ПС  $\Delta S_{i_4}$  и  $\Delta S_{i_5}^*$ , разбиваются на классы независимо устраняемых друг от друга различий. Это, в свою очередь, аналогичным образом разбивает на классы и соответствующие им последовательности действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$  и  $B_{j_5}^{k_2}$ .

Следует отметить, что различия связанные с необходимостью перевода объектов находящихся в ПС из текущего состояния в требуемое, согласно заданной цели, состояние, образуют одноэлементные классы разбиения множества кортежей действий  $B_{j_5}^{k_2}$ .

При этом к каждому классу различий типа "отношения" относятся все пары отношений  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^*o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  или  $o_{i_2}(X_{i_2})r_{i_3}^*$  АИР с пересекающимися по входящим в их структуру объектам. При этом каждый класс разбиения различий не содержит одинаковые объекты ПС  $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$  с другим таким классом. Иначе говоря, разбиение различий на классы проводится таким образом, чтобы для каждого отношения, входящего в определенный класс, существовало бы другое отношение, принадлежащее этому классу, у которого хотя бы один объект является объектом из первого отношения.

2. Выполненное таким образом разбиение множества различий типа "отношения" на классы позволяет провести первый этап их ранжирования, устанавливающего порядок обработки соответствующих им кортежей действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$ . Для этого классы кортежей действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$  на данном этапе ранжируются в порядке снижения трудоемкости обработки входящих в их структуру действий  $b_{i_1} \in B$ .

(Определив после этого порядок обработки различных кортежей действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$  внутри каждого класса разбиения различий типа "отношения" АИР, таким образом, фактически формирует план своей целенаправленной деятельности.)

3. В каждом классе в полученной их упорядоченной последовательности, в первую очередь обрабатываются кортежи действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$ , обеспечивающие устранение различий требующих изменения значений отношений между объектами ПС и АИР в вертикальной плоскости. Например, когда АИР для устранения различия требуется достать и перенести объект, расположенный за пределами рабочей зоны его манипулятора в вертикальной плоскости.

4. Затем обрабатываются кортежи действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$ , когда для устранения связанного с ними различия требуется один объект  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)$  поставить на другой объект  $o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  и оба объекта расположены в одной горизонтальной плоскости с АИР.

5. В последнюю очередь обрабатываются кортежи действий  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$ , обеспечивающие изменения местоположения одного объекта ПС относительно ее другого объекта.

(Третий этап определения порядка обработки действий входящих в структуру кортежей  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$  выполняется в процессе реализации АИР сформированного плана поведения построенного на основе рассмотренных в пп. 1-5 правил. Этот этап связан с обеспечением условий результативного выполнения действий путем их обработки над определенными объектами, входящими в структуру изменяемых на их основе отношений.)

6. Если к структуре двух отношений  $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1)r_{i_3}^*o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  и  $o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)r_{i_3}^*o_{i_2}^3(X_{i_2}^3)$ , относящихся к одному классу, принадлежит один и тот же объект  $o_{i_2}^2(X_{i_2}^2)$  и при устранении различия, определяемого первым отношением, действия соответствующего ему кортежа  $B_{j_4}^{1k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$  обрабатывались над данным объектом, то для устранения различия связанного со вторым отношением, действия входящие в структуру соответствующего ему кортежа  $B_{j_4}^{2k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$  следует обработать, манипулируя объектом  $o_{i_2}^3(X_{i_2}^3)$ .

Такая обработка действий входящих в структуру кортежей  $B_{j_4}^{k_1}(r_{i_3}^*, r_{i_3}^{**})$ , относящихся к различным классам устраняемых различий, позволяет избежать искажения результатов полученных АИР на предыдущем шаге поведения, которое может произойти при выполнении действий на следующем шаге целенаправленной деятельности.

### Заключение

1. Предложенная модель представления и обработки знаний обеспечивает АИР возможность определять результативные действия, обработка которых АИР приводит к преобразованию текущей подситуации ПС в ее целевую ситуацию, определяемую заданной целью поведения.

2. Разработанный метод ранжирования различий текущей и целевой подситуациями ПС позволяет АИР установить порядок результативной обработки выявленных на первом этапе планирования поведения действий и на этой основе автоматически построить план целенаправленной деятельности в априори неопределенных условиях ПС с высоким уровнем неопределенности условий функционирования.

3. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с разработкой модели представления и обработки знаний типа “запросы и ответы”, позволяющей АИР планировать целенаправленное поведение в нестабильных априори неописанных ПС.

#### Литература

1. Павловский В.Е., Павловский В.В. Технологии SLAM для подвижных роботов: состояние и перспективы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 1. « 6. С. 384–394.
2. Labbé, M, Michaud, F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation / Field Robotics. 2019. No 35. Pp. 416– 446.
3. Заева К.А., Семенов А.Б. Метод маршрутизации с препятствиями на основе параллельных вычислений // Вестник ТвГУ. Прикладная математика. 2016. Вып. 3. С. 85–95.
4. Tomás Lozano-Pérez, Michael A. Wesley. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles // Communications of the ACM. 1979. Vol. 22. Rel. 10. Pp. 560–570.
5. Варламов О.О., Алладдин Д.В. О применении миварных сетей для интеллектуального планирования поведения роботов в пространстве состояний // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6–2 (86). С. 75–82.
6. Давыдов О.И., Платонов А.К. Роботы и искусственный интеллект. Технократический подход // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 112. 24 с.
7. Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.Н., Каляев И.А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М: Наука. 1990. 147 с.
8. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения автономных интеллектуальных мобильных систем в условиях неопределенности: под ред. проф. В.М. Хачумова. СПб.: Политехника, 2022. 276 с.
9. Романов П.С., Романова И.П. Подходы к созданию интеллектуальной системы управления мобильным роботом // Инженерный вестник Дона. 2018. №1(48). С. 55–68.
10. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
11. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Fuzzy semantic networks as an adaptive model of knowledge representation of autonomous intelligent systems // Scientific and Technical Information Processing. 2021. Vol. 48. No 5. Pp. 1–8.
12. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений: пер. с англ. М.: Мир, 1976. 168 с.

#### References

1. Pavlovskij V.E., Pavlovskij V.V. Tekhnologii SLAM dlya podviznyh robotov: sostoyanie i perspektivy [SLAM technologies for mobile robots: state of the art and prospects], Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2016. T. 1. « 6. S. 384–394.
2. Labbé, M, Michaud, F. RTAB - Map as an open - source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large - scale and long - term online operation, Field Robotics, 2019, No 35, pp. 416– 446.
3. Zaeva K.A., Semenov A.B. Metod marshrutizacii s prepyatstviyami na osnove paralel'nyh vychislenij [Routing method with obstacles based on parallel computing], Vestnik TvGU, Prikladnaya matematika, 2016, Vypusk 3, pp. 85–95.
4. Tomás Lozano-Pérez, Michael A. Wesley. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles, Communications of the ACM, 1979, Vol. 22, Rel. 10, pp. 560–570.
5. Varlamov O.O., Aladdin D.V. O primeneni mivarnyh setej dlya intellektual'nogo planirovaniya povedeniya robotov v prostranstve sostoyanij [On the use of mivar networks for intelligent planning of the behavior of robots in the state space], Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN, 2018, No 6–2 (86), pp. 75–82.
6. Davydov O.I., Platonov A.K. Roboty i iskusstvennyj intellekt. Tekhnokraticeskij podhod [Robots and artificial intelligence. Technocratic approach], Preprint IPM im. M.V. Keldysha, 2017, No 112, 24 s.
7. Kalyaev A.V., CHernuhin YU.V., Noskov V.N., Kalyaev I.A. Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnyh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots], M., izd. “Nauka”, 1990, 147 s.
8. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Planirovanie povedeniya avtonomnyh intellektual'nyh mobil'nyh sistem v usloviyah neopredelennosti [Planning the Behavior of Autonomous Intelligent Mobile Systems under Uncertainty], pod red. prof. V.M. Hachumova, SPb., izd. “Politehnika”, 2022, 276 s.
9. Romanov P.S., Romanova I.P. Podhody k sozdaniyu intellektual'noj sistemy upravleniya mobil'nym robotom [Approaches to the creation of an intelligent control system for a mobile robot], Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, No. 1(48), pp. 55–68.
10. Pospelov D.A. Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika [Situational management: theory and practice], M., izd “Nauka”, 1986, 288 s.
11. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Fuzzy semantic networks as an adaptive model of knowledge representation of autonomous intelligent systems, Scientific and Technical Information Processing, 2021, Vol. 48, No 5, pp. 1–8.
12. Zade L. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoj i ego primenenie dlya prinyatiya priblizhennyh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application for making approximate decisions], per. s angl. . M., “Mir”, 1976, 168 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Российская Федерация, 367015. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70; E-mail: pashka1602@rambler.ru

**Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, 367015. Republic of Dagestan, Makhachkala, pr. Imam Shamilya, 70. E-mail: pashka1602@rambler.ru

**Михаил Вячеславович Хачумов**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, 152021? с. Вельково, Ярославская обл.; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва (ФИЦ ИУ РАН), 117313. г. Москва, Россия, пр. 60-летия Октября, д.9; доцент кафедры информационных технологий, ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов» Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. E-mail: khmike@inbox.ru

**Mikhail V. Khachumov**, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher, Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, 152021, Veskovo, Russian Federation, Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Russian Federation (FRC CSC RAS), 117313. pr. 60-letiya Oktyabrya, 9; Docent of the Information Technologies Department, Peoples' Friendship University of Russia, 117198, Moscow Miklukho-Maklaya str. 6,. E-mail: khmike@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.08.2022.

Научная статья

УДК 681.3.07

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.036>

## Метод мобильной радиосвязи

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, М.А. Гареева<sup>1</sup> zavertannay6@mail.ru

<sup>1</sup>Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а

**Аннотация** Развитие морских интеллектуальных систем и их телекоммуникационного оборудования в ближайшее время будет происходить в условиях обострения проблем, связанных с: ростом уровня помех; повышенных требований к удельной пропускной способности; ограничений на ресурсы связи, сокращение допустимого времени реакции на изменение условий среды связи и взаимодействия носителей телекоммуникационного оборудования в ближней зоне. В работе предлагается новый способ мобильной связи, учитывающий перечисленные факторы. Целью работы является сокращение времени реакции радиосети на изменение условий при выполнении хэндовера и роуминга. Задача предусматривает анализ технологий подвижной радиосвязи. Вопрос развития особенно остро стоит для морского транспорта в условиях интенсивного движения в проливах, когда требуется интеллектуальный помощник в выработке вариантов управленческого решения во взаимодействии по технологии V2X. Статья посвящена поиску направлений по совершенствованию мобильной связи на морском транспорте. Актуальность связана с возрастанием скоростей носителей абонентов, интенсивности движения и отсутствием новых потенциальных возможностей по наращиванию пропускной способности телекоммуникационных систем. Метод решения поставленных задач основан на анализе развития и прогнозировании требований к мобильной радиосвязи. Новизна заключается в построении инициатора виртуальной мобильной сети, собираемой из доступных радиосистем связи на время решаемой задачи. Основные выводы: достигнут новый технический результат - сокращение времени реакции радиосети на изменение условий и ограничений работы мобильной радиосвязи.

**Ключевые слова:** подвижная связь, методы обработки, транспорт, время реакции сети.

**Для цитирования:** Павликов С.Н., Копаева Е.Ю., Колесов Ю.Ю., Петров П.Н., Гареева М.А... Метод мобильной радиосвязи, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 282—287.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.036>

## Method of mobile radio communication

Sergey N. Pavlikov<sup>1</sup> psn1953@mail.ru, Ekaterina Y. Kopaeva<sup>1</sup> katya.kopaeva.97@mail.ru, Yuriy Y. Kolesov<sup>1</sup> kolesov\_jr@mail.ru, Pavel N. Petrov<sup>1</sup> PavelNikol97@gmail.com, Marina A. Gareeva<sup>1</sup> zavtrannay6@mail.ru,

<sup>1</sup>Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelsky, Russia Federation

**Abstract:** The development of marine intelligent systems and their telecommunications equipment in the near future will occur in the conditions of aggravation of problems associated with: the growth of the level of interference; increased requirements for specific throughput; restrictions on communication resources, reduction of the permissible reaction time to changes in the conditions of the communication environment and the interaction of telecommunication equipment carriers in the near zone. The paper proposes a new method of mobile communication, taking into account the listed factors. The aim of the work is to reduce the reaction time of the radio network to changes in conditions when performing handling and roaming. The task involves the analysis of known mobile radio communication technologies. The issue of development is especially acute for maritime transport in conditions of heavy traffic in the straits, when an intelligent assistant is required in the development of management solution options in interaction with V2X technology with available facilities and infrastructure. The article is devoted to the search for directions for improving mobile communication in maritime transport. The relevance is associated with an increase in the speed of subscriber carriers, traffic intensity and the lack of new potential opportunities to increase the capacity of telecommunication systems. The aim of the work is to reduce the reaction time of the radio network to changes in conditions when performing handling and roaming. The task involves the analysis of known mobile radio communication technologies. The issue of development is especially acute for maritime transport in conditions of heavy traffic in the straits, when an intelligent assistant is required in the development of management solution options in interaction with V2X technology with available facilities and infrastructure. The article is devoted to the search for directions for improving mobile communication in maritime transport. The relevance is associated with an increase in the speed of subscriber carriers, traffic intensity and the lack of new potential opportunities to increase the capacity of telecommunication systems. The method of solving the tasks is based on the analysis of the development and forecasting of requirements for mobile radio communication. The novelty lies in the construction by the initiator of a virtual mobile network assembled from available radio communication systems at the time of the task being solved. The main conclusions A new technical result has been achieved - reduction of the reaction time of the radio network to changes in the conditions and restrictions of mobile radio communication.

**Keywords:** mobile communication, processing methods, transport, network reaction time.

**For citation:** Pavlikov S.N., Kopaeva E.Yu., Kolesov Yu.Yu., Petrov P.N., Gareeva M.A. Method of mobile radio communication, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 282—287.

### Введение

Развитие инфокоммуникационных технологий и систем связи (ИКТСС) продолжается, и специалисты отрасли находятся в постоянном поиске новых методов повышения эффективности мобильных систем радиосвязи. ИКТСС являются основным элементом морских интеллектуальных систем и сами содержат нейронные сети, методы добывания информации, алгоритмы подготовки управленческих решений и компоненты искусственного интеллекта. Критерии эффективности претерпевают изменения от поколения к поколению ИКТСС. В работах [1 - 3] предприняты попытки прогнозирования стратегии развития ИКТСС в составе морских интеллектуальных систем [3], к ним относятся основные тенденции, приведенные в таблице 1 [4 - 5]. Развитие методов мобильной связи основано на удовлетворении возрастающих потребностей пользователей.

Таблица 1

#### Критерии оценки методов мобильной связи

п./п.	Критерий	Динамика в раз
1	Сокращение реакции и времени доставки сообщения	10
2	Увеличение скорости передачи и пропускной способности	100
3	Повышение помехоустойчивости и помехозащищенности	1000

Интенсивное внедрение ТКСС приводит: к быстрому росту количества одновременно работающих абонентов в ограниченном пространственно временном объеме радиосети, построению сетей на основе принципа многоэтажного частотно-временного планирования. Использование моделей каналов с виртуальными антеннами, случайными антенными решетками [6] расширяет область информационного взаимодействия и является фундаментом расширения теории и практики ИКТСС. Значимость исследований возрастает с учетом широкого внедрения Интернет-вещей, новых критериев, новых технологии M2M, P2P, M2I и др. [4, 7]. В работе [9] рассмотрены варианты объединения сетей различного уровня и с различными протоколами информационного обмена. Показано, что построение интегрированных гибридных многоуровневых и динамически перестраиваемых сетей является перспективным в решении проблем нехватки ресурса для связи. Исследованиям адаптивных маршрутизаторов посвящена работа [7] в которой рассмотрены архитектура и алгоритм управления постепенным расширением пространства для формирования маршрутов в ответ на возникающие перегрузки. В работе [5, 8] приводятся особенности поколений ИКТСС до 5G включительно, показаны структурные и технологические изменения, позволяющие обеспечить эффективность расширенного спектра инфокоммуникационных услуг с разнообразными требованиями и в долгосрочной

перспективе. В основе построения известных ИКТСС используются технологий: повторного использовании ресурсов, прежде всего частот; реализация непрерывности связи абонентов при передаче обслуживания «handover» и «roaming; контроль местоположения мобильных абонентов и прогнозирования их перемещения по отношению к зонам освещенности, полутеней и теней базовых станций (БС) «своей» и соседних сетей; контроль качества каналов и управление маршрутизацией пакетов сообщений и др. Анализ приведенных работ в данной области показал наличие потенциальных направлений по увеличению эффективности управления в сети путем расширения функциональных возможностей участников виртуальной сети, позволяющего обеспечить: увеличение удельной пропускной способности, уменьшение времени задержки пакетов и сообщений, улучшение других параметров с достижением более высокого качества радиосвязи [8]. В таблице 2 приведены характеристики известных методов мобильной связи.

Таблица 2

#### Характеристика методов мобильной связи

.Способы радиосвязи, Пат. РФ	Недостатки
№2474052, Способ подвижной радиосвязи, авторы: Богданов А.С., Шевцов В.А., Громаков Ю.А А.В., Оpubл. 27.01.2013 Бюл.№3	Базовая станция выполняет функции организатора сети.
№2227373, Способ сотовой радиосвязи, авторы: Шевцов В.А., Громаков Ю.А, Оpubл. 20.04.2020	Организатор сети - центр управления системы сотовой связи.
№2107401, способ управления обменом информации в сетях с многоуровневым сетевым управлением и система для его реализации, автор Маленев В.И., Оpubл. 20.03.1998	Многоуровневое сетевое управление не предусматривает передачу функций организатора сети абонентскому терминалу.
№22667390, Способ сотовой радиосвязи, авторы: Лохвицкий М.С., Шорин А.О. Оpubл. 19.09.2018 Бюл. №26	Организатор сети - базовая станция передает на мобильную станцию свои характеристики и расстояние до неё.
№2516704, Система радиосвязи с подвижными объектами, авторы Кейстович А.В. Оpubл. 20.05.2014 Бюл. №14	Наземный комплекс управляет назначением частот для связи с подвижными объектами.

Анализ основных тенденций развития ИКТСС показал спрос на: виртуальных операторов контента, антенных полей, но отсутствует выполнение принципа приоритета пользователей, самим стать организаторами своих персональных, семейных, корпоративных сетей.

## 1. Задачи исследования

Задачей исследования является создание высокоэффективного способа мобильной (подвижной) радиосвязи с высокими техническими и потребительскими качествами, снижению: времени реакции сети на установление связи и обмена информацией между абонентами – участниками данной виртуальной сети.

Потребительский результат - сокращение времени доставки сообщения адресату, а также повышению скорости передачи информации. Технический результат предлагаемого способа заключается в увеличении его эффективности и повышении качества обеспечиваемой связи за счет формирования организатором из доступных ресурсов разных операторов сотовой связи собственной, виртуальной, сети подвижной связи (ВСПС). Подвижные станции (ПС) выполнены с возможностью работать в соответствии с множеством различных стандартов протоколов.

Указанный технический результат достигают способом подвижной радиосвязи, содержащим операции:

- получения в зоне сети подвижной радиосвязи радионавигационного поля, содержащего сведения о координатах границ зон обслуживания БС, а также их необходимые характеристики;

- формирования радионавигационного поля (РНП), с помощью которого определяют местоположение и параметры движения ПС, такие как скорость и направление;

- синхронизации работы ПС и БС;

- передачи информации по различным каналам к ПС и от нее к другим выбранным элементам сети или сетей;

- согласования с другими выбранными для участия во вновь образуемой виртуальной сети мобильной связи, элементы которой обладают функциями работы в соответствии с множеством различных стандартов протоколов;

- формирования собственную виртуальную сеть (ВС) подвижной связи, которая включает доступные БС со своей инфраструктурой, а также ведомые подвижные и стационарные станции, при этом информацию, полученную от составляющих ее элементов, созданная ВС использует для организации информационного взаимодействия, которым она управляет до завершения своего действия и передачи составляющих ее элементов с функциями и ресурсами штатным владельцам.

## 2. Метод мобильной связи

В преимущественном варианте осуществления способа ВС подвижной связи под управлением организатора упомянутой сети обеспечиваются следующие процедуры обработки поступающей информации:

- данные о местоположении элементов ВСПС используют для измерения и прогнозирования направления излучения и приема антенными системами участников сети;

- информацию о степени загруженности элементов ВСПС и о качестве связи между ними используют для оптимизации маршрутизации пакетов сообщений;

- в соответствии с текущей загруженности

каналов БС вносят изменения в технологию разделения каналов радиосвязи, используя различные протоколы, сигналы и другие методы, включая изменение параметров каналов;

- кроме того, с использованием РНП, организуются дополнительные радиоканалы информационного обмена между ПС и БС, в том числе через БС других операторов сотовой связи, пользуясь динамически определяемыми идентификаторами, включенными в состав ВСПС её организатором, а также путем применения к элементам ВСПС технологии разделения радиоканалов и изменения их параметров: частоты, видов модуляции и кодирования, сдвигов аргумента несущего колебания и его масштаба;

- включение в состав ВСПС БС различных операторов подвижной связи выполняют по принципу нахождения их в непосредственной близости от ПС, включая ПС - организатора виртуальной сети, т.е. по условию наименьшего объема потребляемых ими энергетических и других ресурсов.

Осуществление предлагаемого метода иллюстрируется рисунками 1 и 2. На рис. 1 представлена схема алгоритма, содержащая следующие операции:

1 - в ПС по сигналам РНП определяют ее местоположение, скорость и направление движения;

2 - сравнивают координаты границ зоны обслуживания текущей БС и координаты своего местоположения;

3 - формируют и до участников сведения о РНП;

4 - при приближении и пересечении границы зоны обслуживания текущей БС ПС, используя данные сформированного РНП, производит выбор новой БС;

5 - ПС передает в ВСПС информацию, включающую координаты своего текущего и планируемого местоположения, скорость и направление движения и планируемый переход на другие БС;

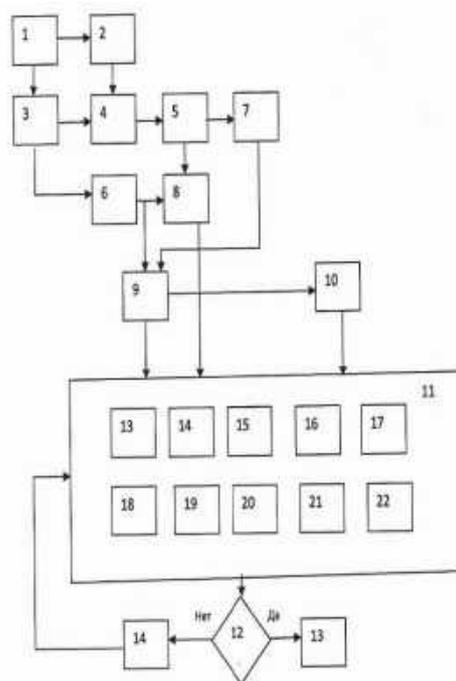


Рис. 1

6 - синхронизация работы ПС и БС;

7 - данные о местоположении ПС используют для определения направлений излучений антенных систем ВСПС;

8 - информацию РНП используют также для предоставления услуг, связанных с определением местоположения абонентов сети подвижной радиосвязи и других пользователей;

9 - данные РНП применяют для организации дополнительных каналов информационного обмена между ПС и БС, при этом полученную от ПС информацию о местоположении используют для выбора маршрутов соединения между элементами ВСПС;

10 - границы зон обслуживания БС изменяют в зависимости от текущей загруженности последних;

11 - ПС, выполненная с возможностью работать в соответствии с множеством различных стандартов протоколов, получив информацию от доступных сетей подвижной (мобильной, сотовой) радиосвязи, после согласования с последними, а также с другими подвижными и стационарными станциями, работающими по различным стандартам протоколов, формирует собственную виртуальную сеть подвижной связи, в состав которой, кроме упомянутого организатора (ведущего), входят доступные базовые станции со своей инфраструктурой, а также ведомые подвижные и стационарные станции, при этом полученную от элементов ВСПС информацию организатор виртуальной сети применяет при организации информационного взаимодействия, которым управляет вплоть до завершения действия ВСПС;

12 - условием завершения действия ВСПС является выполнение поставленной задачи и/или истекшее оговоренное время ее действия;

13 - передача элементов ВСПС с функциями и ресурсами штатным владельцам;

14 - организация необходимых процедур по выполнению блока 11, включающих действия, указанные в блоках 15–22;

15 - данные о местоположении элементов ВСПС используют для определения направлений излучения и приема антенными системами участников ВСПС;

16 - использование информации о степени загруженности элементов ВСПС и о качестве связи между ними для оптимизации маршрутизации пакетов сообщений;

17 - внесение, в соответствии с текущей загруженностью каналов БС, изменений в технологию разделения каналов радиосвязи, в том числе с применением различных протоколов, сигналов и других приемов разделения радиоканалов, изменение их параметров;

18 - использование РНП для формирования дополнительных каналов информационного обмена между ПС и БС, в том числе через БС других операторов сотовой связи, с применением динамически определяемых и/или назначаемых идентификаторов абонентов (SIM, eSIM карт), включенных в состав ВСПС её организатором, а также путем применения к элементам ВСПС технологии разделения радиоканалов и изменения их параметров;

19 - определение и включение в состав ВСПС БС различных операторов подвижной связи, осуществляемое по принципу их непосредственной

близости от подвижных станций, в том числе от ПС - организатора ВСПС, требующей наименьшего объема потребляемых энергетических и других ресурсов ПС;

20 - управление используемыми ресурсами ВСПС, осуществляемое подвижной станцией - организатором ВСПС с применением поступающей к ней информации от БС разных операторов, расположенных на доступном для устойчивой связи расстоянии относительно текущего местоположения, а также планируемого маршрута движения;

21 - кроме того, использование ПС - организатором ВСПС информации, поступающей к ней от элементов ВСПС об их местоположении, скорости и направления движения как мгновенных (текущих), так и планируемых на заданном интервале времени;

22 - прогнозируемая взаимная ориентация местоположений элементов ВСПС на заданный интервал упреждения во времени, позволяющая определить перечень решаемых задач и оптимизировать организацию и управление ВСПС на оговоренный промежуток времени.

### 3. Реализуемость работы метода

На рисунке 2 схематично показан принцип работы ВСПС со следующими обозначениями:

MS-V – подвижная станция, играющая роль ведущей: при ее движении анализируют инфраструктуру пространства, выбирают элементы которые или сразу входят в состав виртуальной сети на период её действия или, возможно, дополняют ее в процессе передвижения.

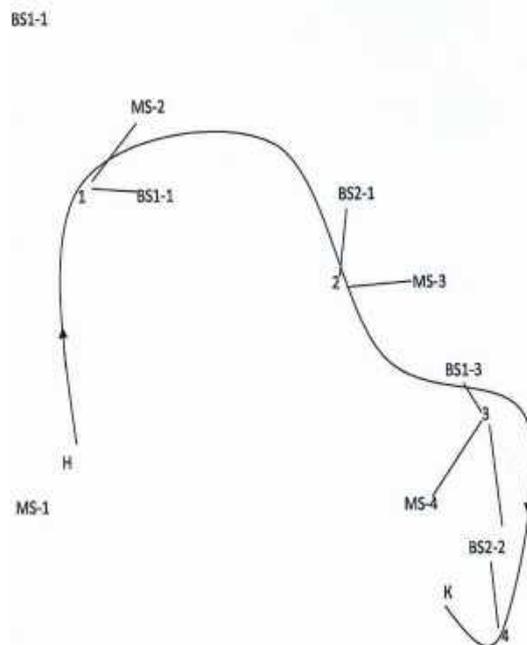


Рис. 2

MS - 1, 2, 3, 4 – ПС абонентов;  
 BS - 1.1, 1.2, 1.3 – БС первого сотового оператора подвижной связи;  
 BS - 2.1, 2.2 – БС второго сотового оператора подвижной связи;  
 1, 2, 3, 4 – точки маршрута движения MS-V;

Н и К – начало и конец маршрута движения MS-V при выполнении задачи.

MS-V формирует ВСПС и по критерию минимально необходимого для выполнения задачи расхода ресурсов выбирает для включения в виртуальную сеть BS-1.2, MS-2, затем, приближаясь к точке 2, дополняет сеть подвижными станциями BS-2.1, MS-3, а в третьей точке подключает к ВСПС станции BS -2.2, BS -1.3, MS-4 и выводит из состава ВСПС станции BS-1.2, MS-2, в точке 4 виртуальная сеть прекращает свое действие, а MS-V остается на связи с BS-2.2. Прогнозируемая взаимная ориентация элементов виртуальной сети в заданном интервале упреждения по времени позволяет определить перечень решаемых задач и оптимизировать организацию и управление ВСПС в оговоренном промежутке времени. При известной траектории и знании необходимых ресурсов возможно планирование и своевременный заказ услуг, согласование оплаты и приоритетов в предоставлении услуг, оповещение участников о планируемом выполнении и завершении задания.

### Заключение

Достигнут востребованный технический результат - сокращение времени реакции радиосети на изменение условий и ограничений работы мобильной радиосвязи, особенно в условиях

возрастанием скоростей носителей абонентов, интенсивности движения, угрозы потери соединения, отказа в обслуживании в реализации процессов хэндовера и роуминга. Увеличение эффективности способа и повышение качества связи достигается за счет формирования одной из ПС сети подвижной радиосвязи собственной, ВС подвижной связи (ВСПС) из доступных ресурсов разных операторов сотовой связи, сети общего пользования и других, например спутниковых, ионосферных, метеорных и других радиоканалов. Сокращение времени на реакцию сети достигается отсутствием необходимости затрат времени на запросы между абонентами для связи, они уже в процессе информационного обмена. Надежность связи обеспечивают операторы арендуемых ресурсов, выделяемых в соответствии с планом прогнозируемых процессов выполнения поставленной задачи. Таким образом, создаются условия значительного увеличения одновременно используемых информационных технологий в единице меняющегося пространства, что позволяет реализовать новый подход не разделения, а кооперации средств информационного обмена в интеллектуальной самоорганизующейся системы, для совместного выполнения расширенного круга задач.

### Литература

1. Склад Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение / Б. Склад - Москва: Вильямс, 2016. 1099 с.
2. Гутковская О.Л., Пономарёв Д.Ю. Применение ортогональной модели телекоммуникационной сети для решения задачи оптимального распределения трафика // Кибернетика и программирование. 2017. № 1. С. 11-29. doi: 10.7256/2306-4196.2017.1.21810URL. [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=21810](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=21810)
3. Интеллектуальная поддержка принятия решения в интересах управления связью ВМФ. Учебник. // СПб.: ВМА, 2015, 329 с.
4. Степутин А.Н, Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. Вологда; Инфра-инженерия, 2018. Т 2. 420 с.
5. Ahmet Yazar and Hüseyin Arslan . Flexible Multi-Numerology Systems for 5G New Radio // Article No: 2 Pp. 367-394. doi: <https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.1442>
6. Винник Л.В., Колесниченко В.И., Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Шацкий В.В. Метод синтеза линейной виртуальной антенной решетки. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/2/text.pdf>. doi: 10.30898/1684-1719.2020.1.2
7. Симаков Д.В. Управление трафиком в сети с высокой динамикой метрик сетевых маршрутов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №1. 2016 <http://naukovedenie.ru/PDF/60TVN116.pdf>. doi: 10.15862/60TVN116
8. Мочалов А.В., Павликов С.Н., Убанкин Е.И Новые направления в развитии телекоммуникационных систем. Владивосток: ВГУЭС. 2016. 116 с. [Электронный ресурс] <https://search.rsl.ru/ru/record/01008475605>

### References

1. Sklar B. Digital Communication: Theoretical Basics and Practical Application / B. Sklyar. Moscow: Williams, 2016. 1099 p. (In Rus)
2. Gutkovska O.L., Ponomar in D.J. Applying an orthogonal model of the telecommunications network to solve the problem of optimal traffic distribution / Cybernetics and programming. 2017. № 1. Pp. 11-29. doi: 10.7256/2306-4196.2017.1.21810URL. [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=21810](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=21810)
3. Intelligent decision support for Navy communications management. Textbook. SPb.: VMA, 2015, 329 p.4.
4. 4 Steputin A.N., Nikolaev A.D. Mobile Communication on the way to 6G. Infra-engineering, 2018, T.2. 420 p. (In Rus)
5. Ahmet Yazar and Hüseyin Arslan . Flexible Multi-Numerology Systems for 5G New Radio // Article No: 2 Pp. 367-394. doi: <https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.1442>
6. Vinnik L.V., Kolesnichenko V.I., Litvinov A.V., Mishchenko S.E., Shatsky V.V. Method of synthesis of linear virtual antenna grille. The Journal of Electronics. 2020. № 1. Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/2/text.pdf>. doi: 10.30898/1684-1719.2020.1.2 (In Rus)
7. Симаков Д.В. Управление трафиком в сети с высокой динамикой метрик сетевых маршрутов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том №1. 2016 <http://naukovedenie.ru/PDF/60TVN116.pdf>. doi: 10.15862/60TVN116

8. Mochalov A.V. New directions in the development of telecommunications systems: monograph / A.V. Mochalov, S.N. Pavlikov, E.I. Ubankin. Vladivostok: VSUES. 2016. – 116p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008475605>, date of access 09.03.2021. (In Rus)

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

**Сергей Николаевич Павликов**, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: psn1953@mail.ru.

**Екатерина Юрьевна Копаева**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: kattya.kopaeva.97@mail.ru.

**Юрий Юрьевич Колесов**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: kolesov\_jr@mail.ru.

**Павел Николаевич Павлов**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: PavelNikol97@gmail.com

**Марина Анатольевна Гареева**, аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, 690059, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: zavertannay6@mail.ru

**Sergej N. Pavlikov**, Ph.D. (Eng), Professor, Professor of the Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russia Federation, e-mail: psn1953@mail.ru.

**Ekaterina Y. Kopayeva**, graduate student of the Department of Radio Electronics and Radio Communication Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russia Federation, e-mail: kattya.kopaeva.97@mail.ru.

**Yuriy Y. Kolesov**, graduate student of the Department of Radio Electronics and Radio Communication Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russia Federation, e-mail: kolesov\_jr@mail.ru.

**Pavel N. Pavlov** graduate student of the Department of Radio Electronics and Radio Communication Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russia Federation, e-mail: PavelNikol97@gmail.com

**Marina A. Gareeva** graduate student of the Department of Radio Electronics and Radio Communication Department of Radio Electronics and Radio Communications, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russia Federation, e-mail: zavertannay6@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 25.11.2021.  
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.07.2022.  
Принята к публикации/accepted for publication 25.08.2022.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

### AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 656.61.052.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.037>

#### Адаптивная модель движения судна в системах управления

А.С. Васьков<sup>1</sup> [as.vaskov@mail.ru](mailto:as.vaskov@mail.ru), А.Н. Штанько<sup>1</sup> [a.n.shtanko@internet.ru](mailto:a.n.shtanko@internet.ru)

<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** Предлагается способ построения адаптивной модели горизонтального движения судна для различных режимов и условиях плавания, как системы управления ее параметрами. Процесс настройки исходной нелинейной модели осуществляется на основании задач идентификации моделируемого процесса в сравнении с реальным процессом движения судна. Оценка соответствия адаптации нелинейной модели реальному движению судна выполняется с использованием квадратичного критерия обобщенной работы (КОР). Задача системы идентификации формируется методами аналитического конструирования оптимальных регуляторов А.А. Красовского для управления скоростями изменения настраиваемых параметров адаптивной модели по КОР. Получены управляющие воздействия изменения настраиваемых параметров адаптивной модели. Подтверждение работоспособности адаптивной модели осуществляется по экспериментальным данным движения имитационной модели судна. Приведенное экспериментальное моделирование показало хорошее качество идентификации и адаптации обобщенной модели движения судна предложенным способом. Даются рекомендации по выбору основных параметров системы идентификации: постоянной времени и коэффициентов усиления настраиваемых параметров. Адаптивная модель предназначена в качестве прогнозирующей в системах автоматического управления и поддержки принятия решений судоводителем.

**Ключевые слова:** Адаптивная модель движения судна, квадратичный критерий обобщенной работы, оптимальный регулятор, настройка параметров адаптивной модели.

**Для цитирования** Васьков А.С., Штанько А.Н. Адаптивная модель движения судна в системах управления, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 288—295.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.037>

#### Adaptive model of vessel movement in control systems

Anatoliy S. Vas'kov<sup>1</sup> e-mail: [as.vaskov@mail.ru](mailto:as.vaskov@mail.ru), Aleksandr N. Shtanko<sup>1</sup> e-mail: [a.n.shtanko@internet.ru](mailto:a.n.shtanko@internet.ru),

<sup>1</sup>Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** A method is proposed for constructing an adaptive model of the horizontal movement of a vessel for various modes and conditions of navigation, as a control system for its parameters. The process of setting up the initial nonlinear model is carried out on the basis of identification tasks of the simulated process in comparison with the real process of ship movement. The assessment of the conformity of the adaptation of the nonlinear model to the real movement of the vessel is carried out using the quadratic criterion of generalized work. The task of the identification system is formed by the methods of analytical design of optimal regulators by A.A. Krasovsky to control the rates of change of the adjustable parameters of the adaptive model according to the criterion of generalized work. The control effects of changing the adjustable parameters of the adaptive model are obtained. The performance of the adaptive model is confirmed by the experimental data of the motion of the simulation model of the vessel. The above experimental modeling showed a good quality of identification and adaptation of the generalized model of vessel movement in the proposed way. Recommendations are given on the choice of the main parameters of the identification system: the time constant and the gain coefficients of the configurable parameters. The adaptive model is intended as a predictive one in automatic control systems and decision support by the skipper.

**Key words:** Adaptive model of vessel movement, quadratic criterion of generalized operation, optimal controller, adjustment of adaptive model parameters.

**For citation:** Anatoliy S. Vas'kov, Aleksandr N. Shtanko, Adaptive model of vessel movement in control systems, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 288—295.

#### Введение

Одним из путей оптимизации управления движением судна в различных условиях плавания является создание систем, использующих прогнозирующую перестраиваемую модель в соответствии с этими условиями. Однако,

перестройка параметров модели и их связей на основании данных ходовых испытаний судна не может дать приемлемых результатов из-за значительного числа факторов, влияющих на движение судна, и сложности их аналитического представления [1, 2, 5, 7, 9]. Более широкие возможности представляются при использовании

адаптивных моделей, настраиваемых на основании задачи идентификации моделируемого процесса по реальным процессам движения судна в момент настройки.

### 1. Настройка адаптивной модели судна

Общие принципы формирования процессов идентификации и адаптации модели движения судна представлены структурной схемой рис. 1.

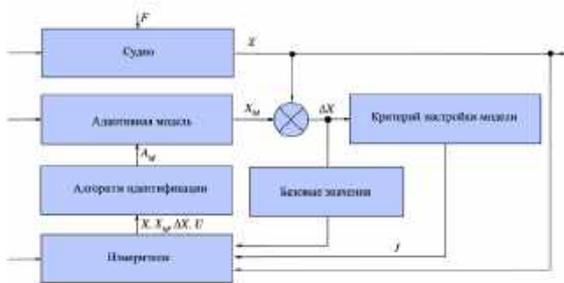


Рис. 1. Идентификация и адаптация модели движения судна.

В каждый момент времени к судну и на вход адаптивной модели приложены управляющие воздействия ( $U$ ). На судно также действуют внешние возмущения ( $F$ ). Вектор элементов состояния судна ( $X$ ) зависит от управляющего воздействия, внешних возмущений и вектора параметров ( $A$ ), характеризующих динамические качества судна.

Вектор состояния адаптивной модели движения судна ( $X_M$ ) зависит от вектора ее настраиваемых параметров ( $A_M$ ), получаемых с помощью алгоритма идентификации. Настройка параметров модели осуществляется по текущим измерениям векторов состояний судна, модели, рассогласований их значений ( $\Delta X$ ), обеспечивая соответствие критерию качества настройки адаптивной модели ( $J$ ).

Поскольку алгоритм идентификации формируется по принятой адаптивной модели судна и критерию качества идентификации, оценивающим близость модели и объекта, то однозначный выбор алгоритма возможен лишь при однозначном выборе адаптивной модели и критерия [1, 3, 5, 9 - 13].

Теория идентификации предоставляет возможность широкого выбора настраиваемых моделей [8, 10, 11]. Однако, как правило, эти математические модели могут быть применимы для частных режимов движения судна. Целью настоящего исследования является создание обобщенной адаптивной прогнозирующей модели движения судна в различных условиях плавания.

На основании различных фундаментальных исследований [1, 2, 7, 8, 14, 16, 18, 19] уравнения исходной модели горизонтального движения судна в системе прямоугольных координат предлагается представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} (m + \lambda_1) \frac{dV_x}{dt} - (m + \lambda_2) V_y \omega &= F_x; \\ (m + \lambda_2) \frac{dV_y}{dt} + (m + \lambda_1) V_x \omega &= F_y; \end{aligned} \quad (1)$$

$$(I_z + \lambda_3) \frac{d\omega}{dt} - (\lambda_1 - \lambda_2) V_x V_y = M_z,$$

где  $m, \lambda_j$  – масса судна и присоединенные массы воды;  $V_x, V_y, \omega$  – проекции линейной скорости движения судна на оси координат, связанные с судном, и угловая скорость поворота судна вокруг вертикальной оси;  $I_z, \lambda_3$  – моменты инерции судна и присоединенной массы воды;  $F_x, F_y, M_z$  – проекции суммарных сил и вращающего момента, действующих на судно.

Значения сил и моментов в правой части уравнений (1) зависят от скоростей судна, характеристик его корпуса, средств управления, внешних условий и в исследованиях по управляемости судов аппроксимируются степенными и тригонометрическими функциями [1, 2, 7, 9, 13 -16, 19]. В связи с этим в уравнениях могут входить дополнительные нелинейные слагаемые, содержащие проекции линейной и угловой скоростей движения судна, подобные расширенные модели использовались в работе [2].

Для решения задачи идентификации адаптивной модели силы и моменты, входящие в уравнения (1), можно представить линейными функциями измеряемых управляющих воздействий на судно:

$$\begin{aligned} F_x &= b_1 n + b_2 \delta; \\ F_y &= b_3 n + b_4 \delta; \\ M_z &= b_5 n + b_6 \delta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n$  – частота вращения винта, об/мин;  $\delta$  – угол перекладки руля, град;  $b_i$  – коэффициенты управляющих сил и моментов руля и винта.

При указанном способе аппроксимации внешних воздействий коэффициенты  $b_j$  будут нелинейными функциями скоростей движения и других параметров, учитывающих влияние условий плавания.

Структуру идентифицируемой модели предлагается принять аналогичной уравнениям движения судна (1), и представить в форме уравнений состояния в развернутом виде, разделив все слагаемые системы (1) на коэффициенты при производных:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1M} - x_{2M} &= 0; \\ \dot{x}_{2M} + a_{1M} x_{4M} x_{6M} + a_{2M} n + a_{3M} \delta &= 0; \\ \dot{x}_{3M} - x_{4M} &= 0; \\ \dot{x}_{4M} + a_{4M} x_{2M} x_{6M} + a_{5M} n + a_{6M} \delta &= 0; \\ \dot{x}_{5M} - x_{6M} &= 0; \\ \dot{x}_{6M} + a_{7M} x_{2M} x_{4M} + a_{8M} n + a_{9M} \delta &= 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$x_M = [x_{1M}, \dots, x_{6M}]; \quad A_M = [a_{1M}, \dots, a_{9M}];$$

$$\begin{aligned} a_{1M} &= \frac{m + \lambda_2}{m + \lambda_1}; & a_{4M} &= -\frac{m + \lambda_1}{m + \lambda_2}; & a_{7M} &= \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{I_z + \lambda_3}; \\ a_{2M} &= \frac{b_1}{m + \lambda_1}; & a_{5M} &= \frac{b_3}{m + \lambda_2}; & a_{8M} &= \frac{b_5}{I_z + \lambda_3}; \\ a_{3M} &= \frac{b_2}{m + \lambda_1}; & a_{6M} &= \frac{b_4}{m + \lambda_2}; & a_{9M} &= \frac{b_6}{I_z + \lambda_3}, \end{aligned}$$

где  $\dot{x}_{1M} = x_{2M} = V_x; \dot{x}_{3M} = x_{4M} = V_y; \dot{x}_{5M} = x_{6M} = \omega$  – составляющие вектора состояния адаптивной модели судна;  $a_{iM}$  – составляющие вектора настраиваемых параметров модели;  $X_M, A_M$  – векторы состояния адаптивной модели судна и настраиваемых параметров модели, значения составляющих которого отнесены к массе и моменту инерции судна, соответственно.

Адаптивную идентификацию модели (3), как процесс управления параметрами на соответствие реальному движению судна, предлагается осуществлять методом аналитического

$$J = W_K[\Delta X, X_M, A_M] \exp\left(\frac{t}{T_J}\right) + \frac{1}{2} \int_t^{t+T} \Delta X^T Q_x \Delta X \exp\left(\frac{t}{T_J}\right) dt + \frac{1}{2} \int_t^{t+T} \left[ U_A^T K_A^{-2} U_A + U_{A,op}^T K_A^{-2} U_{A,op} \right] dt; \quad (4)$$

$$K_A^{-2} = K^2 \exp\left(\frac{2t}{T_J}\right)$$

где  $W_K$  – квадратичная функция конечной оценки качества идентификации;  $Q_x$  – диагональная матрица квадратичной формы рассогласования векторов состояния модели и судна;  $\tau$  – символ транспонирования матриц;  $T$  – интервал оптимизации процесса адаптации модели;  $K_A^{-2}$  – диагональная матрица веса слагаемых критерия качества идентификации;  $K$  – коэффициент усиления (выбирается пропорционально скоростям изменения настраиваемых параметров);  $T_J$  – постоянная времени затухания критерия согласования;  $U_A = \dot{A}_M$  – вектор управления процессом идентификации (соответствует скоростям изменения настраиваемых параметров).

Поскольку процесс идентификации нелинейный и нестационарный, экспоненциальные множители введены для обеспечения положительной

конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) по минимуму квадратичного критерия обобщенной работы (КОР), т.е. суммарных действий управляющих воздействий и рассогласований адаптивной модели с реальным движением судна (см. рис.1). Метод АКОР для синтеза систем управления и понятие критерия обобщенной работы было введено А.А. Красовским [10], получило апробацию и приложения в исследованиях по разработке систем навигации и управления судном [2, 5, 9]. Критерий обобщенной работы для оценки качества идентификации модели движения судна представляется в виде:

определенности минимизирующей функции критерия согласования (4) и его затухания в соответствии с рекомендациями данными в работе [10].

Таким образом, задача идентификации сводится к оптимизации по КОР (4) управления скоростями изменения настраиваемых параметров обобщенной адаптивной модели (3).

В соответствии с основной теоремой АКОР по КОР (4) оптимизация управления перестройкой параметров адаптивной модели (3) с учетом преобразований, аналогичных приведенным в работах [2, 5, 10], сводится к решению матричных линейных уравнений:

$$\dot{P}_x + \frac{1}{T_J} P_x - J_x^T P_x = -Q_x [X_M - X]; \quad P_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_M}{\partial X_M} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\dot{P}_A + \frac{1}{T_J} P_A = J_A^T P_x; \quad P_A = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_M}{\partial A_M} \end{bmatrix};$$

$$J_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_M}{\partial X_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & a_{4M}x_{6M} & 0 & a_{7M}x_{4M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{1M}x_{6M} & -1 & 0 & 0 & a_{7M}x_{2M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{1M}x_{4M} & 0 & a_{4M}x_{2M} & -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$J_A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_M}{\partial A_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{4M}x_{6M} & n & \delta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{2M}x_{6M} & n & \delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{2M}x_{4M} & n & \delta \end{bmatrix}; \quad (7)$$

где  $P_x, P_A$  – векторы проекций функции  $W_K$  на вектор состояния модели судна (3) и на вектор его настраиваемых параметров, обеспечивающие минимум КОР (4);  $J_x, J_A$  – матрицы Якоби, образованные из функциональных зависимостей уравнений состояния модели (3) по векторам

состояния и настраиваемым параметрам, соответственно.

В результате оптимальное управление скоростью настройки параметров адаптивной модели (3), обеспечивающее минимум КОР (4) ее согласования с реальным движением, примет вид

$$U_{op} = \dot{A}_M = -K_A^2 P_A. \quad (8)$$

Решение систем дифференциальных уравнений (3), (5) и (8) дает адаптивную настраиваемую модель горизонтального движения судна со значениями гидродинамических коэффициентов для конкретного режима движения и условий плавания. При работе рассматриваемого алгоритма идентификации и оптимизации адаптивной модели ее параметры будут зависеть от текущих измерений вектора состояния (X) и вектора состояния адаптивной модели (X<sub>M</sub>) (см. рис.1). Следовательно, погрешности измерения вектора состояния судна и параметров модели будут коррелированы. Поэтому матрицу квадратичной формы Q<sub>x</sub> погрешностей модели в КОР (4) целесообразно задавать в виде ковариационной матрицы погрешностей измерения в соответствии с работами [2, 5, 10] Q<sub>x</sub> = R<sup>-1</sup>.

С физической точки зрения алгоритмы идентификации и адаптации модели (5) представляют динамическую систему, внешним воздействием на которую является рассогласование между векторами состояния модели и судна [X<sub>M</sub> - X] (см. рис.1). Динамика данной системы зависит от параметров модели (5), ее состояния и постоянной времени затухания (T<sub>J</sub>).

Постоянная времени, в свою очередь, зависит от нестационарности модели судна (3). Малые значения постоянной времени алгоритма (5) будут соответствовать локальной оптимизации параметров модели (3) в данной точке траектории движения судна и уравнения (5) превращаются в алгебраические. Такие значения постоянной времени целесообразно задавать для малых отрезков движения судна. На длительных отрезках движения судна значения постоянной времени необходимо выбирать большими для оптимизации параметров модели (3).

Уравнения (8) представляют собой интегрирующие звенья, выход которых в случае приращения значений параметров зависит от

величины входа (P<sub>A</sub>) и переменного коэффициентов усиления (κ<sub>A</sub><sup>2</sup>). Следовательно, значения параметров модели (3) будут иметь приращения при ненулевых решениях уравнений (5), т.е. при наличии рассогласований векторов состояний модели (3) и измерений параметров движения судна (см. рис.1). Результаты решений уравнений (5) могут быть ненулевыми даже при совпадении векторов состояний модели и движения судна и в данном случае, будут зависеть от самих параметров судна (6), а также от значений вектора состояния модели (7). Такое явление характерно при повороте судна или при изменении режима работы двигателя. Это полностью подтверждает реальные физические процессы, происходящие при маневрировании судна, и следующие из теоретических и экспериментальных исследований по управляемости судна [1, 7, 9, 14, 16, 19].

## 2. Вычислительный эксперимент

Для подтверждения теоретических положений проводилось экспериментальное моделирование по данным движения имитационной модели быстроходного, устойчивого на курсе судна водоизмещением 700 т на спокойной воде со скоростью 14 узлов, при маневрировании, включая циркуляции, при которых гидродинамические коэффициенты несомненно изменяются.

По выражениям (3) в среде MATLAB-Simulink выполнялось моделирование движения судна. При этом значения вектора настраиваемых параметров модели выбирались произвольными (табл. 1), результаты моделирования представлены на рис. 2.

Таблица 1

Исходный (случайный) набор коэффициентов

	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	w
a <sub>1M</sub>	0,0005	a <sub>4M</sub> 0,0001	a <sub>7M</sub> 0,011
a <sub>2M</sub>	0,00004	a <sub>5M</sub> 0,00004	a <sub>8M</sub> 0,000001
a <sub>3M</sub>	0,0000001	a <sub>6M</sub> 0,013	a <sub>9M</sub> 0,2542

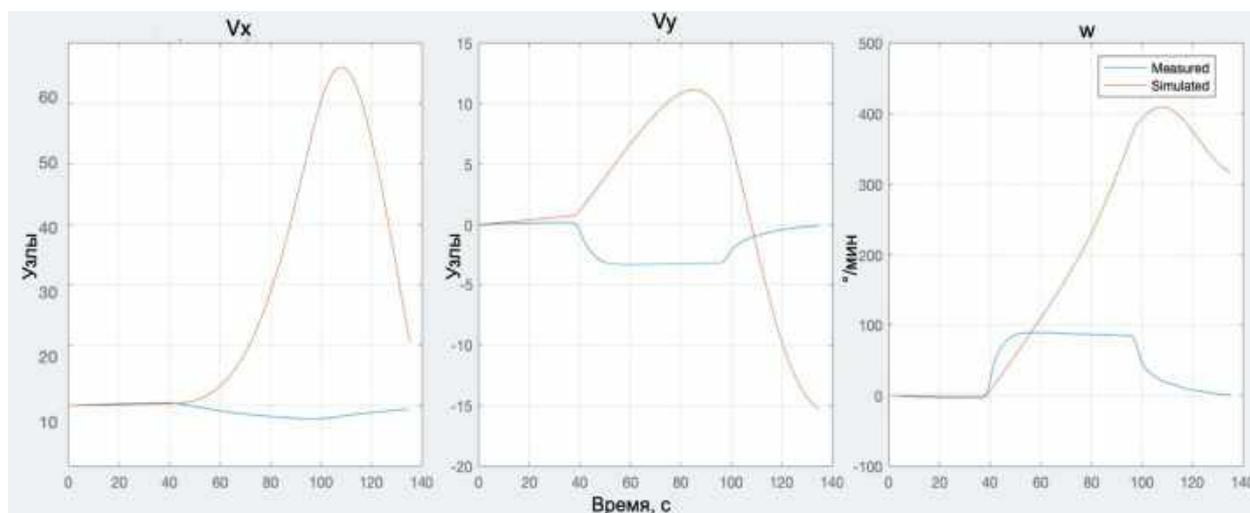


Рис. 2. Моделирование движения судна на циркуляции с исходным набором параметров модели.

Процесс настройки (идентификации) параметров адаптивной модели по выражениям (3), (5) и (8) показан на рис.3. Идентифицированные параметры

адаптивной модели приведены в табл. 2, результаты моделирования представлены на рис. 4

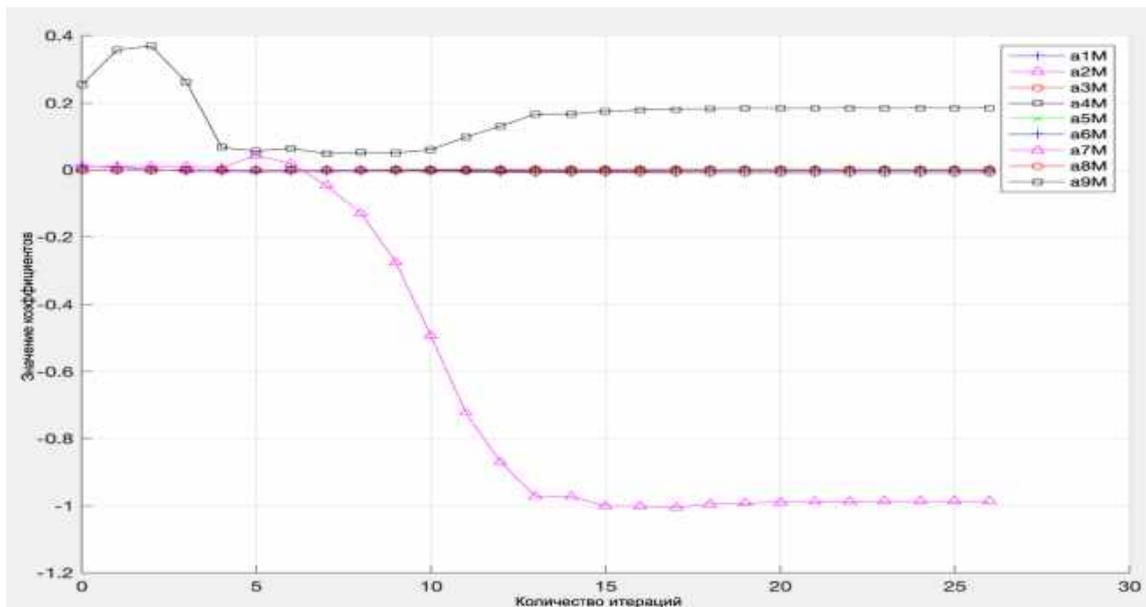


Рис. 3. Идентификация гидродинамических коэффициентов модели движения судна на циркуляции.

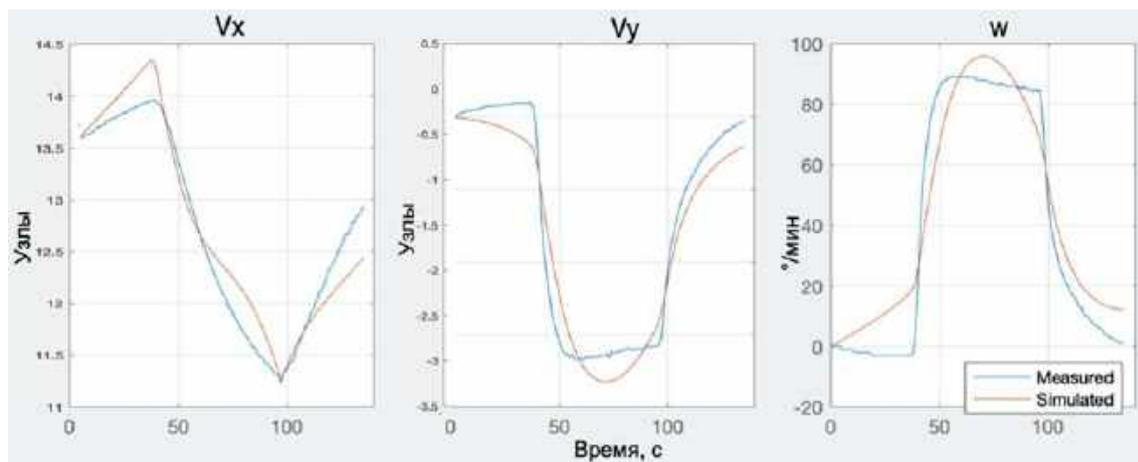


Рис. 4. Моделирование движения судна на циркуляции с идентифицированным набором параметров модели.

Таблица 2  
Идентифицированные значения коэффициентов

	$V_x$		$V_y$		$w$
$a_{1M}$	-0,000289	$a_{4M}$	-1,90e-05	$a_{7M}$	-0,98612
$a_{2M}$	0,0001104	$a_{5M}$	0,0015117	$a_{8M}$	0,0020759
$a_{3M}$	-0,007399	$a_{6M}$	-0,008235	$a_{9M}$	0,18333

Процесс адаптации модели, как видно из рис. 3, занял 26 итераций.

Проверка адаптивной модели на наборе данных, полученных при маневрировании в изменившихся условиях плавания (ветер 140° - 10 м/с, волнение моря 1,0 м – 160°) представлена на рис 5.

Процесс настройки параметров адаптивной модели по выражениям (3), (5) и (8) показан на рис. 6, новые адаптированные параметры модели приведены в табл. 3, результаты моделирования с этими параметрами представлены на рис. 7.

Таблица 3

Адаптированный набор коэффициентов

	$V_x$		$V_y$		$w$
$a_{1M}$	-0,000231	$a_{4M}$	-0,00017	$a_{7M}$	-1,8072
$a_{2M}$	7,813e-05	$a_{5M}$	0,0024736	$a_{8M}$	0,0033926
$a_{3M}$	0,0068688	$a_{6M}$	-0,009773	$a_{9M}$	0,29731

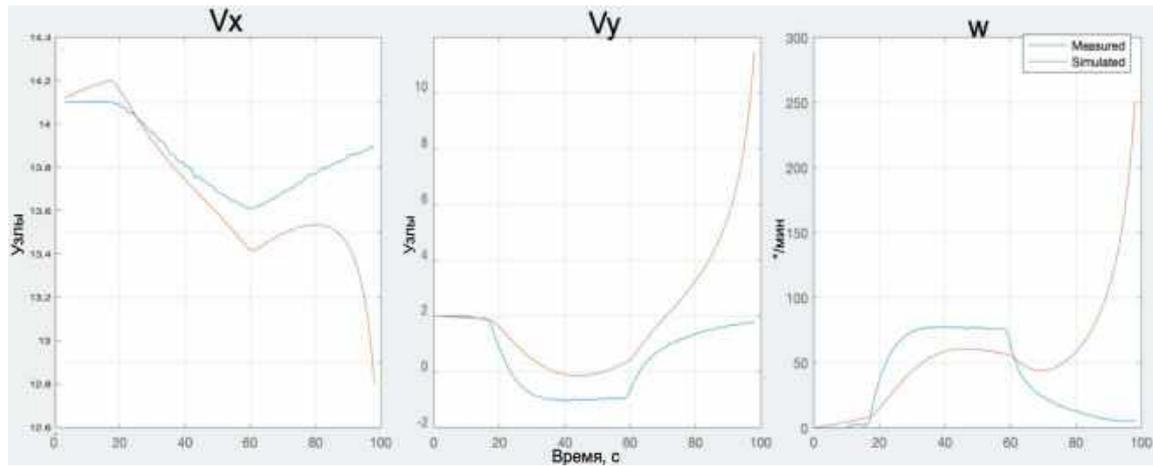


Рис. 5. Моделирование движения судна на циркуляции в изменившихся условиях плавания.

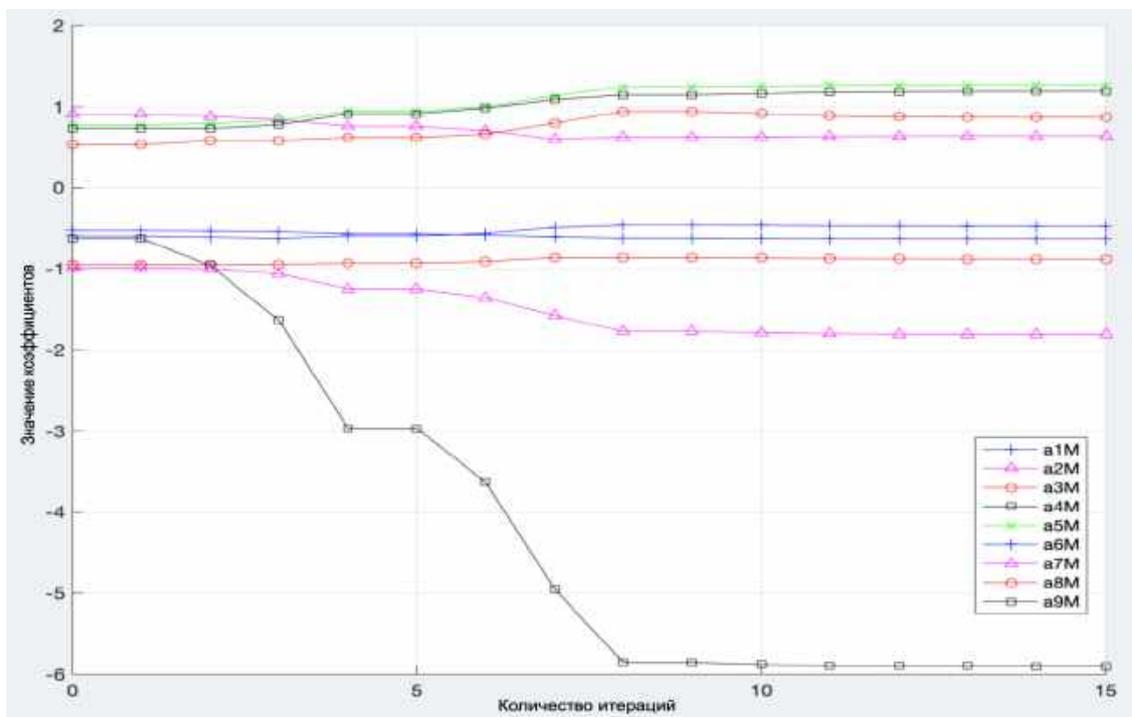


Рис. 6. Адаптация гидродинамических коэффициентов модели движения судна на циркуляции.

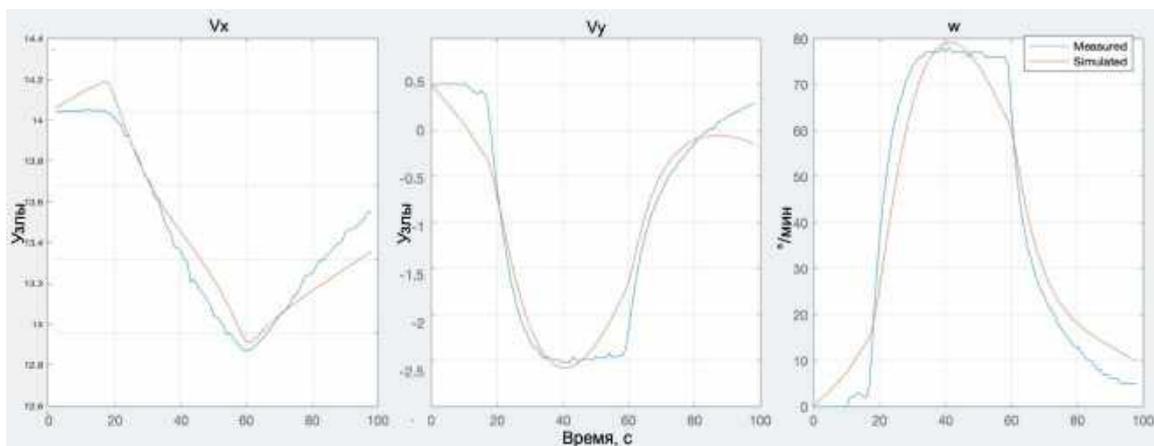


Рис. 7. Моделирование движения судна на циркуляции в изменившихся условиях плавания с адаптированным набором параметров модели.

### Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что нелинейная адаптивная модель движения судна (1), (3) отвечает основным законам гидромеханики. Адаптивная модель движения судна может быть использована в качестве базовой при синтезе алгоритмического

обеспечения адаптивных систем управления движением судна, а также в системах поддержки принятия решений судоводителем для решения практических задач по формированию оптимальных траекторий, выбора режимов движения и маневрирования судна в различных условиях плавания.

### Литература

1. Васильев А.В. Управляемость судов. Л., Судостроение, 1989, 328 с.
2. Васьков А.С. Методы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности. Новороссийск: НГМА, 1997, 248 с.
3. Васьков А.С., Бурылин Я.В. Адаптивное управление угловой скоростью поворота судна. Эксплуатация морского транспорта, 2016, № 4 (81). С. 37-42.
4. Васьков А.С., Грищенко А.А. Сопровождение параметров траектории движения судна. Морские интеллектуальные технологии, 2019, № 4 (46), Т.3, С. 77 – 82.
5. Васьков А.С., Меньшенин О.И., Студеникин А.И. Обобщенная адаптивная модель движения судна. Сб. Методы и технические средства морской навигации. М., В/О «Мортехинформреклама», 1996, С. 48-52.
6. Меньшенин О.И., Васьков А.С. Основы построения систем автоматического управления движением судна. М., В/О «Мортехинформреклама», 1985, 76 с.
7. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. Л., Судостроение, 1983.- 272 с.
8. Решетникова Г.Н. Адаптивные системы: учебное пособие. Томск: Томский государственный университет, 2016, 112 с.
9. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. Л., Судостроение, 1976.
10. Справочник по теории автоматического управления. Под ред. А.А.Красовского. М., Наука, 1987, 712 с.
11. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. М., Наука, 1984, 320 с.
12. Aguiar A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning of an underactuated AUV in the presence of a constant unknown ocean current disturbance. Proc. IFAC - 15th World Congress, Barcelona, Spain, July 2002.
13. Fossen T.I., Smogeli O.N. Nonlinear time-domain strip theory formulation for low-speed manoeuvring and station-keeping. Modeling. Identification and Control, 2004, Vol.25, № 4, p.201–221.
14. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Wiley & Sons Ltd, 2011, 567 p.
15. Hammoud S. Ship motion control using multi-controller structure. Journal of maritime research, 2012, Vol. IX, №1, pp.45-52.
16. The Manoeuvring Commtee. Final report and recommendation to the 24th ITTC, 2005, Vol.2, 62 p.
17. Vanni F. Aguiar A.P. Pascoal A.M. Cooperative path-following of underactuated autonomous marine vehicles with logic-based communication. Research supported in part by projects GREX/CEC-IST (Contract No. 035223), NAV-Control / FCT-PT (PTDC/EEA-ACR/65996/2006), p.6.
18. Yoon H.K., Rhee K.P. Identification of hydrodynamic coefficients in ship maneuvering equations of motion by Estimation-Before-Modeling technique. Ocean Engineering, 2003, № 30, p.2379–2404.
19. Yoshimura Y. New mathematical model of hydrodynamic hull force in ocean and harbor manoeuvring. Proc. of JASNAOE, 2007, 4, pp.271-274, (in Japanese).

### References

1. Vasil'ev A.V. Upravlyaemost' sudov [Controllability of vessels]. L., Sudostroenie, 1989, 328 s.
2. Vas'kov A.S. Metody upravleniya dvizheniem sudna i konfiguratsiyey zony navigatsionnoy bezopasnosti [Methods for controlling the movement of the vessel and the configuration of the navigation safety zone]. Novorossiysk: NGMA, 1997, 248 s.
3. Vas'kov A.S., Burylin Ya.V. Adaptivnoe upravlenie uglovoy skorost'yu povorota sudna [Adaptive control of the angular rate of rotation of the vessel]. Eksploatatsiya morskogo transporta, 2016, № 4 (81). S. 37-42.
4. Vas'kov A.S., Grishchenko A.A. Soprovozhdenie parametrov traektorii dvizheniya sudna [Support of the parameters of the trajectory of the vessel]. Morskije intellektual'nye tekhnologii, 2019, № 4 (46), T.3, S. 77 – 82.
5. Vas'kov A.S., Men'shenin O.I., Studenikin A.I. Obobshchennaya adaptivnaya model' dvizheniya sudna [Generalized adaptive model of vessel movement.]. Sb. Metody i tekhnicheskie sredstva morskoy navigatsii. M., V/O «Mortekhinformreklama», 1996, S. 48-52.
6. Men'shenin O.I., Vas'kov A.S. Osnovy postroeniya sistem avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna [Fundamentals of building automatic vessel motion control systems]. M., VO «Mortekhinformreklama», 1985, 76 s.
7. Pershits R.Ya. Upravlyaemost' i upravlenie sudnom [Controllability and control of the vessel]. L., Sudostroenie, 1983.- 272 s.
8. Reshetnikova G.N. Adaptivnye sistemy: uchebnoe posobie [Adaptive systems]. Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyy universitet, 2016, 112 s.
9. Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizatsiya sudovozhdeniya [Ship controllability and navigation automation]. L., Sudostroenie, 1976.
10. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A.A.Krasovskogo [Handbook of the theory of automatic control]. M., Nauka, 1987, 712 s.
11. Tsyppin Ya.Z. Osnovy informatsionnoy teorii identifikatsii [Fundamentals of the information theory of identification]. M., Nauka, 1984, 320 s.

12. Aguiar A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning of an underactuated AUV in the presence of a constant unknown ocean current disturbance. Proc. IFAC - 15th World Congress, Barcelona, Spain, July 2002.
13. Fossen T.I., Smogeli O.N. Nonlinear time-domain strip theory formulation for low-speed manoeuvring and station-keeping. Modeling, Identification and Control, 2004, Vol.25, № 4, p.201221.
14. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Wiley & Sons Ltd, 2011, 567 p.
15. Hammoud S. Ship motion control using multi-controller structure. Journal of maritime research, 2012, Vol. IX, №1, pp.45-52.
16. The Manoeuvring Committee. Final report and recommendation to the 24th ITTC, 2005, Vol.2, 62 p.
17. Vanni F., Aguiar A.P., Pascoal A.M. Cooperative path-following of underactuated autonomous marine vehicles with logic-based communication. Research supported in part by projects GREX/CEC-IST (Contract No. 035223), NAV-Control / FCT-PT (PTDC/EEA-ACR/65996/2006), p.6.
18. Yoon H.K., Rhee K.P. Identification of hydrodynamic coefficients in ship maneuvering equations of motion by Estimation-Before-Modeling technique. Ocean Engineering, 2003, № 30, p.2379–2404.
19. Yoshimura Y. New mathematical model of hydrodynamic hull force in ocean and harbor manoeuvring. Proc. of JASNAOE, 2007, 4, pp.271-274, (in Japanese).

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

**Анатолий Семенович Васьков**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Судовождение, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 393518, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: as.vaskov@mail.ru

**Anatoliy S. Vas'kov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov State Maritime University, 353918, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, Russian Federation, e-mail: as.vaskov@mail.ru

**Александр Николаевич Штанько**, аспирант кафедры Судовождение, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 393518, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: a.n.shtanko@internet.ru

**Aleksander N. Shtanko**, graduate student of the Department of Navigation, Admiral Ushakov State Maritime University, 353918, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, Russian Federation, e-mail: a.n.shtanko@internet.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 20.07.2022.

Научная статья

УДК 656.07

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.038>

## Совершенствование транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок на основе водного транспорта при реализации стратегических целей транспортного комплекса

К.Г. Тюленев<sup>1</sup> kirill.tulenev@gmail.com

<sup>1</sup>Научный центр по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации

**Аннотация.** Формирование оптимальной структуры транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок на основе морского транспорта, проводимое в рамках реализации Транспортной стратегии Российской Федерации, в настоящее время является одним из ключевых векторов межотраслевого взаимодействия. В условиях новых внешнеэкономических ограничений особую значимость приобретает внедрение комплексных мер поддержки экспорта транспортных услуг, предусматривающее совершенствование оценки, анализа и прогнозирования целевых индикаторов. Учитывая современные тенденции перераспределения экспортных грузопотоков и высокие темпы обновления базовых транспортно-технологических схем организации мультимодальных перевозочных процессов в системе международных транспортных коридоров, проходящих по территории Российской Федерации, в научной статье представлена концепция достижения стратегических целей развития транспортного комплекса, основанная на использовании методики расчета валовой прибыли в единицу времени. Интегрированное развитие субъектов рынка мультимодальных перевозок с применением вышеупомянутой методики, использованное в процессе деятельности российских подразделений международных транспортных компаний, содействует усилению конкурентоспособности сети распределения продукции, росту экспорта транспортных услуг, реализации стратегических задач транспортной отрасли.

**Ключевые слова:** мультимодальность, контейнеризация, межконтинентальные перевозки, прогнозирование, верификация, формализация, стандартизация, оптимизация, интегрированное взаимодействие, экспорт транспортных услуг, транспортное планирование.

**Для цитирования:** Тюленев К. Г., Совершенствование транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок на основе водного транспорта при реализации стратегических целей транспортного комплекса. 2022. № 3 часть 1, С. 296—301.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.038>

## Development of technological transport schemes for multimodal carriage applying water transport within the achievement of industrial strategic targets

Kirill G. Tyulenev<sup>1</sup> kirill.tulenev@gmail.com

<sup>1</sup>Research and Analysis Centre for Integrated Transport Solutions, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Formation of optimal structure for technological transport schemes in the multimodal carriage based on maritime transport, within the implementation of Transport Strategy of the Russian Federation, at present time belongs to the key vectors of intersectoral industrial cooperation. In the context of new external economic limitations, the introduction of comprehensive measures supporting export of transport services, including the improvement of assessment, analysis and forecasting of target indicators, is coming to the status of special importance. Considering current trends of redistributing export cargo flows and high renewal frequency referring to basic technological transport schemes of multimodal carriage processes in the system of International Transport Corridors, crossing territory of the Russian Federation, the provisions of scientific article represent concept of achieving strategic targets for transport complex development based on application of the Methodology for estimating gross profit per time period. Integrated entities development in the market of multimodal transportation services, directed by above mentioned Methodology, used in the course of managing production activity for the Russian divisions of international transport companies, contributes to the strengthening of competitiveness for product distribution network, increasing volume of released export transport services, implementing strategic targets of transport industry.

**Keywords:** multimodality, containerization, intercontinental transportation, forecasting, verification, formalization, standardization, optimization, integrated cooperation, export of transport services, transport planning.

**For citation:** Kirill G. Tyulenev, Development of technological transport schemes for multimodal carriage applying water transport within the achievement of industrial strategic targets, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 296—301.

### Введение

Реализация стратегических задач национального транспортного комплекса в действующих условиях

изменений межконтинентальных маршрутов перевозок, трансформации базовых цепей поставок, перераспределения грузопотоков в системе международных транспортных коридоров,

определяет целесообразность развития транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок на основе водного транспорта путем детализации верифицированных данных, внедрения формализованной стандартизированной структуры операций перевозочного процесса, использования механизма выбора приоритетной схемы мультимодальной перевозки в рамках методики оценки валовой прибыли в единицу времени [1].

Введение подходов, предусматривающих высокую частоту актуализации оценки и детализации верифицированных данных, с учетом временных ограничений, заданных для решения транспортных задач, способствует повышению качества моделирования и оптимизации работы логистических систем, достижению ключевых целей Транспортной стратегии Российской Федерации по увеличению объемов экспорта транспортных услуг.

### 1. Оценка целевых показателей стратегического планирования в современных условиях внешнеэкономической деятельности

Макроэкономические факторы, вызванные внешнеэкономическими условиями и пандемией коронавируса COVID-19, оказали существенное воздействие на общий объем, а также динамику экспорта транспортных услуг на пространстве ЕАЭС, СНГ, в страны дальнего зарубежья.

Суммарный объем экспорта транспортных услуг за 2021 г. по состоянию обновления на июль 2022 г. составил 15 455 420 тыс. долларов США [2], что на 16,62 % больше значения данного показателя по четырем видам транспорта за 2020 г.

Положительным стимулирующим фактором развития экспорта транспортных услуг являлось возрастание объема мультимодальных перевозок [3] и потребности в контейнеризации грузов.

Изменения маршрутов грузопотоков и трансформация товаропроводящей сети [4] способствовали высокой востребованности транспортно-технологических схем мультимодальных контейнерных перевозок на основе линейного судоходства.

При интеграции видов транспорта в процессе формирования схем мультимодальной перевозки первостепенным значением обладает скоординированное взаимодействие водного и наземных видов транспорта. Совместное развитие субъектов рынка морских, железнодорожных и автомобильных контейнерных перевозок является стратегически важным базисом повышения конкурентоспособности транспортных коридоров «Восток-Запад», «Север-Юг», Азово-Черноморского и Восточного направлений перевозок, реализации регионального транзитного потенциала, увеличения экспорта транспортных услуг.

Учитывая мировую эпидемиологическую и внешнеэкономическую обстановку, для восстановительного роста российского экспорта транспортных услуг высоко востребована системная интеграция видов транспорта, развитие товаропроводящей сети, совершенствование транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок в соответствии с рассмотренными подходами детализации верифицированных данных, формализации и

стандартизации ТТС, оценки и прогнозирования процессов стратегического взаимодействия.

Согласно аналитическому исследованию динамики 153 основных показателей, произведенному в рамках сопровождения реализации Транспортной стратегии Российской Федерации и экспорта транспортных услуг на основе методики оценки валовой прибыли в единицу времени [5], для совершенствования оценки целевых индикаторов был введен следующий комплекс мер, обеспечивающий уточнение расчетов путем дополнения прогнозных оценок вычислением детализированных показателей, состоящих из верифицированных исходных данных, фактически доступных по базовым грузопотокам.

В частности, повышение точности результатов мониторинга целевого индикатора экспорта транспортных услуг достигается путем дополнения данных расчетами в натуральном и денежном выражении, на основе краткосрочного сопоставления ценовых соглашений и производственно-сбытовых планов по системообразующим грузопотокам, сопутствующей оценки взаимосвязанных значений отраслевых показателей, применения методики оценки валовой прибыли в единицу времени для выбора и оптимизации оцениваемых транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок.

Следуя этому, в процессе оценки объемов экспорта транспортных услуг были внедрены два специализированных подхода, применяемых совместно для увеличения точности прогнозирования показателей, взаимодополнения и перекрестной проверки, детализации данных и информационно-аналитического обеспечения управленческих решений.

Если для периода, по которому производится оценка, в минимальной степени присутствуют фактические значения реализации транспортных услуг, применяется подход прогнозирования на основе данных предшествующих периодов. При этом следует учитывать, что расчет верхнеуровневых показателей может быть выполнен путем сбора совокупности отдельных краткосрочных натуральных и стоимостных данных, обладающих иным периодом достоверности, вместе с тем достаточным для вычисления верхнеуровневых показателей в требуемом отчетном периоде (в рамках второго подхода оценки экспорта транспортных услуг, сформированного на основе ГОСТ Р 58977-2020).

При оценке величины экспорта транспортных услуг на периоды, по которым стоимостные значения для рассматриваемых видов транспорта полностью отсутствуют, сначала вычисляются доли кварталов от суммарного годового значения:

$$D_{ijm}^r = \frac{F_{ijm}^r}{S_{ijm}} \quad (1)$$

где  $D_{ijm}^r$  - доля, соответствующая  $r$ -ому кварталу по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории экспорта,  $m$ -ому году в общем объеме за  $m$ -ый год по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории транспортных услуг;

$F_{ijm}^r$  - фактическое значение объема экспорта транспортных услуг за  $r$ -ый квартал  $m$ -ого года по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории транспортных услуг;

$S_{ijm}^r$  - суммарное за  $m$ -ый год фактическое значение объема экспорта транспортных услуг по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории экспорта.

Доли кварталов вычисляются как среднее арифметическое между процентной долей, соответствующей данному кварталу:

$$D_{ij}^r = \frac{D_{ij2019}^r + D_{ij2020}^r + D_{ij2021}^r}{3} \quad (2)$$

где  $D_{ij}^r$  - средняя доля, соответствующая  $g$ -ому кварталу по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории экспорта в общем объеме по соответствующему виду транспорта и категории транспортных услуг за предшествующие годы.

Приведенные доли кварталов рассчитываются для транспортно-технологических схем грузоперевозок в межконтинентальном сообщении с использованием морского, железнодорожного и автомобильного транспорта в соответствии с унифицированной структурой групп и комплексов транспортных операций, утвержденной национальным стандартом ГОСТ Р 58977-2020.

После расчета квартальных долей вычисляются коэффициенты кварталов:

$$K_{ij}^r = \frac{D_{ij}^r}{100\%} \quad (3)$$

где  $K_{ij}^r$  - коэффициент  $g$ -ого квартала по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории перевозок.

Таким образом, сумма коэффициентов за 4 квартала составляет 400%.

С помощью рассчитанных квартальных коэффициентов вычисляются отделенные от факторов сезонности объемы перевозок по видам транспорта и категориям грузов. Для этого фактические объемы перевозок за предшествующие кварталы делятся на соответствующие квартальные коэффициенты:

$$O_{ijm}^r = \frac{F_{ijm}^r}{K_{ijm}^r} \quad (4)$$

где  $F_{ijm}^r$  - фактическое значение объема экспорта транспортных услуг за  $g$ -ый квартал  $m$ -ого года по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории транспортных услуг;

$O_{ijm}^r$  - отделенное от фактора сезонности значение экспорта транспортных услуг за  $g$ -ый квартал  $m$ -ого года по соответствующим виду транспорта и категории транспортных услуг.

Таким образом, производится расчет значений, отделенных от влияния сезонности, усредненных относительно предшествующих кварталов, обеспеченных фактическими данными статистики.

Далее на основании полученных данных выстраиваются оценки объемов экспорта транспортных услуг на плановый период.

Определяется среднее значение отделенных от факторов сезонности данных за прошедшие кварталы, по которым есть фактическая отчетность. Полученное среднее значение умножается на соответствующий коэффициент квартала, по которому строится прогноз:

$$P_{ijm}^r = \frac{O_{ij}^{r-3} + O_{ij}^{r-2} + O_{ij}^{r-1}}{3} * K_{ij}^r \quad (5)$$

где  $P_{ijm}^r$  - прогнозная оценка экспорта транспортных услуг за  $g$ -ый квартал  $m$ -ого года по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории транспортных услуг;

$O_{ij}^{r-3}, O_{ij}^{r-2}, O_{ij}^{r-1}$  - отделенные от факторов сезонности данные предшествующих кварталов, по которым присутствуют фактические значения.

Суммарная прогнозная оценка по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории транспортных услуг определяется для целевых регионов или стран дальнего зарубежья.

Рассчитываются суммарные прогнозные значения по каждому виду транспорта и категории транспортных услуг, суммарная прогнозная оценка экспорта транспортных услуг на целевой квартал.

Возможны различные вариации алгоритма для итоговой прогнозной оценки. Например, введение отделенных от факторов сезонности объемов за предшествующие кварталы с различными весовыми коэффициентами (сумма весовых коэффициентов равна единице).

Для итоговой оценки величины экспорта транспортных услуг используется также корректирующий коэффициент  $C_{корр}(i, j, r, m)$ .

Вычисление коэффициента основано на имеющихся данных о будущих изменениях факторов, влияющих на объемы вида экспорта услуг (по  $i$ -ому виду транспорта и  $j$ -ой категории транспортных услуг) и экспертных оценках изменений (например, данных об изменении спроса на мультимодальные перевозки по категориям грузов, перераспределения грузопотоков между маршрутами международных транспортных коридоров).

Корректирующий коэффициент рассчитывается, как среднее арифметическое составляющих:

$$C_{корр}(i, j, r, m) = \frac{C_{корр}^1(i, j, r, m) + C_{корр}^2(i, j, r, m) + \dots + C_{корр}^n(i, j, r, m)}{n} \quad (6)$$

или их среднее геометрическое:

$$C_{корр}(i, j, r, m) = \sqrt[n]{C_{корр}^1(i, j, r, m) * C_{корр}^2(i, j, r, m) * \dots * C_{корр}^n(i, j, r, m)} \quad (7)$$

Полученная после предварительных расчетов оценка  $P_{ijm}^r$  умножается на корректирующий коэффициент:

$$Q_{ijm}^r = P_{ijm}^r * C_{корр}(i, j, r, m) \quad (8)$$

где  $Q_{ijm}^r$  - окончательная прогнозная оценка величины экспорта транспортных услуг за  $g$ -ый квартал  $m$ -ого года по  $i$ -ому виду транспорта,  $j$ -ой категории транспортных услуг.

Суммарные прогнозные оценки по видам транспорта и категориям услуг рассчитываются как суммы соответствующих слагаемых  $Q_{ijm}^r$ .

Для детализации транспортного планирования и содействия достижению стратегической цели роста экспорта транспортных услуг, производится экспертное исследование базовых факторов,

оказывающих влияние на функционирование цепей поставок с применением транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок на основе водного транспорта.

Экспертное исследование обеспечивает увеличение объема доступных фактических данных, позволяющих произвести уточненный расчет целевых индикаторов, в том числе отдельных краткосрочных натуральных и стоимостных показателей, обладающих периодом достоверности, достаточным для вычисления верхнеуровневых индикаторов в требуемом отчетном периоде (согласно унифицированной структуре транспортных операций ГОСТ Р 58977-2020).

Для объединения полученных результатов прогнозирования и фактических расчетов компонентов верхнеуровневых показателей в рамках второго подхода оценки целевых индикаторов, используется комбинированная формула:

$$Q_{ijm}^r = Q_{ijm}^{r, \text{факт}} + Q_{ijm}^{r, \text{прогн}} \quad (9)$$

Таким образом, оценка объема экспорта транспортных услуг по i-ому виду транспорта и j-ой категории транспортных услуг является суммой двух показателей: полученного прогнозного значения и детализированного фактического расчета доступных компонентов, вычисленных благодаря экспертизе натуральных и стоимостных краткосрочных показателей работы транспортного комплекса.

В соответствии с вышесказанным, фактическое значение  $Q_{ijm}^{r, \text{факт}}$  является суммой составляющих, по которым существуют фактические значения на рассматриваемый период:

$$Q_{ijm}^{r, \text{факт}} = Q_{ijm}^{r, \text{факт} 1} + Q_{ijm}^{r, \text{факт} 2} + \dots \quad (10)$$

Прогнозное значение по оставшимся составляющим может строиться двумя методами. Первый метод аналогичен вышеописанному построению прогнозных оценок при отсутствии фактических данных. Производится суммирование по всем составляющим, относящимся к рассматриваемому виду транспорта и категории услуг, по которым отсутствуют фактические данные:

$$Q_{ijm}^{r, \text{прогн}} = Q_{ijm}^{r, \text{прогн} 1} + Q_{ijm}^{r, \text{прогн} 2} + \dots \quad (11)$$

Возможен альтернативный метод расчета  $Q_{ijm}^{r, \text{прогн}}$ , при котором значение показателя за предшествующий период умножается на значение процента, сопоставимого или приравненного к уровню изменения объема по сумме известных составляющих (по которым известно фактическое значение на рассматриваемый период):

$$Q_{ijm}^{r, \text{прогн}} = (Q_{ijm}^{r-1, a1} + Q_{ijm}^{r-1, a2} + \dots) * \frac{Q_{ijm}^{r, \text{факт}}}{Q_{ijm}^{r-1, \text{факт}}} \quad (12)$$

где  $Q_{ijm}^{r-1, a1}, Q_{ijm}^{r-1, a2}, \dots$  - фактические значения составляющих расчета за предшествующий период (по которым неизвестны значения на оцениваемый период);

$Q_{ijm}^{r-1, \text{факт}}$  - суммарное фактическое значение составляющих расчета за предшествующий период, по которым известно значение показателя на оцениваемый период.

Для последующей оценки структуры общего сформированного показателя определяется доля уточненных составляющих, рассчитанных с применением экспертной идентификации краткосрочных натуральных и стоимостных данных, обеспечивающих детализацию целевых индикаторов.

Применение представленного комбинированного подхода способствует повышению точности прогнозных оценок и расширению перечня базовых факторов, учитываемых при моделировании схем мультимодальных перевозок на основе морского судоходства в ходе реализации стратегических целей транспортной отрасли.

## 2. Комплексные меры совершенствования показателей стратегического планирования с использованием мультимодальных ТТС на основе водного транспорта

В условиях усиливающихся тенденций сокращения времени, доступного для принятия управленческих решений по моделированию и оптимизации логистических схем, приобретает особое значение механизм краткосрочного выбора приоритетной схемы мультимодальной перевозки на основе методики оценки валовой прибыли в единицу времени.

Оценка эффективности и выбор приоритетной схемы мультимодальной перевозки из вариаций, открытых в рамках действующих международных транспортных коридоров, предусматривает комплексное рассмотрение стоимостных и натуральных показателей, определение временных периодов выполнения транспортных операций, соблюдение условий безопасности перевозочного процесса при наличии резервных транспортно-технологических схем для рассматриваемого маршрута (в случае оперативного блокирования участков), ограничение временных периодов, заданных для решения актуальных задач (система проектирования конкурентоспособной ТТС линейной перевозки методики оценки валовой прибыли в единицу времени).

С учетом высокой волатильности рынка транспортных услуг [6, 7] представляется целесообразным мониторинг краткосрочных коррекций стоимостных показателей, загрузки объектов инфраструктуры, изменений баланса реализации транспортных услуг по регионам для актуализации и обновления исходных данных, соответствующей оперативной трансформации базовых схем мультимодальных перевозок [8]. Выполнение приведенных задач производится в рамках механизма краткосрочного выбора приоритетной схемы мультимодальной перевозки с ежемесячной или более частой периодичностью.

Отмечая важность обмена статистической информацией при глобальном информационном взаимодействии, целесообразно расширение межгосударственного сотрудничества в направлении формализации данных для совместного анализа и оценки целевых индикаторов работы интегрированных транспортных систем.

Использование схем перевозочных процессов, формализованных и стандартизированных на национальном [9] и межгосударственном уровне, позволяет выявить перспективные возможности соединения отдельных схем мультимодальных перевозок в кругорейсы с обратной загрузкой, что создает экономический эффект благодаря исключению стоимости отдельных транспортных операций и сокращению транзитного времени, одновременно укомплектовывая инструментарий оптимизации рассматриваемых перевозочных процессов схемами репозиционирования оборудования и подвижного состава в регионы с возрастающей потребностью межконтинентальных экспортных перевозок [10].

Для совершенствования мультимодальных транспортно-технологических схем, основываясь на базовых положениях ГОСТ Р 58977-2020 [9] в настоящее время производится разработка специализированных национальных стандартов, сопровождающих дополнительную формализацию комплексов и групп транспортных операций, в целях повышения упорядоченности, интеграции, качества перевозок грузов в системе международных транспортных коридоров, проходящих по территории Российской Федерации.

Стандартизированное взаимодействие логистических систем на основе приведенных подходов детализации данных для расчета целевых индикаторов, в рамках применения механизма

краткосрочного выбора приоритетной схемы доставки, способствует росту коммерческой скорости мультимодальных перевозок, снижению логистических издержек, реализации транзитного потенциала регионов Российской Федерации, приобретая особое значение для развития экспорта транспортных услуг.

### Заключение

Применение подходов детализированной оценки целевых показателей транспортного планирования, использование стандартизированной структуры перевозочных процессов, внедрение механизма краткосрочного выбора приоритетной схемы доставки по методике оценки валовой прибыли в единицу времени способствует совершенствованию ТТС мультимодальных перевозок на основе линейного судоходства.

Представленные комплексные меры развития мультимодальных транспортно-технологических схем обеспечивают информационно-аналитическое сопровождение реализации стратегических целей Транспортной стратегии Российской Федерации, содействуя сбалансированности взаимодействия видов транспорта на межконтинентальных направлениях перевозок, интеграции грузопотоков в единой информационной среде, росту экспорта транспортных услуг.

### Литература

1. Тюленев К.Г. Организация мультимодальных перевозок на основе методики оценки валовой прибыли в единицу времени // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т.1. №1 (55). С. 141-144.
2. «Статистический отчет Центрального банка Российской Федерации - внешняя торговля Российской Федерации услугами в структуре расширенной классификации услуг (по методологии платежного баланса)», [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.cbr.ru/vfs/statistics/credit\\_statistics/trade/63-trade\\_21.xls](https://www.cbr.ru/vfs/statistics/credit_statistics/trade/63-trade_21.xls).
3. «Alphaliner» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.alphaliner.com/top100>.
4. «Marine Traffic» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.marinetraffic.com/ru>.
5. «Доклад о реализации Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года. Отчетный период: 2021 год. Министерство транспорта Российской Федерации». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/file/479860>.
6. «China Containerized Freight Index» (CCFI) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://en.sse.net.cn/indices/ccfinew.jsp>.
7. Тюленев К.Г. Инвестиции судоходных линий в развитие транспортной отрасли // Специализированный научно-практический журнал «Логистика». 2015. № 2 (99). С. 32-35.
8. Тюленев К.Г. Принятие решений по системному управлению линейными контейнерными перевозками // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т.3. №3 (37). С. 97-104.
9. ГОСТ Р 58977-2020 «Перевозки линейные контейнерные. Транспортно-технологические схемы. Основные положения». М, 2020. 7 с.
10. Тюленев К.Г. Управление контейнерными перевозками во внешнеэкономической деятельности. СПб., ИПТ РАН, 2017, 112 с.

### References

1. Tyulenev K.G. Organizatsiya mul'timodal'nykh perevozok na osnove metodiki otsenki valovoy pribyli v yedinitse vremeni [Management of multimodal transportation based on methodology for estimating gross profit per time period]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2022. T.1. №1 (55). S. 141-144.
2. Statisticheskiy otchet Tsentral'nogo banka Rossiyskoy Federatsii - vneshnyaya trgovlya Rossiyskoy Federatsii uslugami v strukture rasshirennoy klassifikatsii uslug (po metodologii platezhnogo balansa Banka Rossii), [https://www.cbr.ru/vfs/statistics/credit\\_statistics/trade/63-trade\\_21.xls](https://www.cbr.ru/vfs/statistics/credit_statistics/trade/63-trade_21.xls).
3. Alphaliner, <http://www.alphaliner.com/top100>.
4. Marine Traffic, <https://www.marinetraffic.com/ru>.
5. Doklad o realizatsii Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda. Otchetnyy period: 2021 god, Ministerstvo transporta Rossiyskoy Federatsii, <https://mintrans.gov.ru/file/479860>.

6. China Containerized Freight Index (CCFI), <https://en.sse.net.cn/indices/ccfinew.jsp>.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Tyulenev K.G. Upravleniye konteynernymi perevozkami vo vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti [Container transportation management in foreign economic activity]. SPb., IPT RAN, 2017, 112 s.

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

**Кирилл Геннадьевич Тюленев**, заместитель директора, Научный центр по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации, 107045, Москва, Пушкин пер., 3, e-mail: kirill.tulenev@gmail.com

**Kirill G. Tyulenev**, deputy director, Research and Analysis Centre for Integrated Transport Solutions», Pushkarev pereulok, 3, Moscow, 107045, Russian Federation, e-mail: kirill.tulenev@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2022

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2022

Научная статья

УДК 656.6; 656.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.039>

## Когнитивный метод формирования модели мультимодального перевозочного процесса в универсальных перегрузочных комплексах крупных морских портов

А.Г. Котенко<sup>1</sup> [algenko@gmail.com](mailto:algenko@gmail.com), И.Г. Малыгин<sup>1,2</sup> [malygin\\_com@mail.ru](mailto:malygin_com@mail.ru), О.А. Королев<sup>1</sup> [korolev@iptran.ru](mailto:korolev@iptran.ru)

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук;

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

**Аннотация.** В статье рассматривается задача выбора наиболее эффективной модели организации перевозочного процесса при перемещении грузов в рамках универсальных перегрузочных комплексов (УПК) транспортно-логистических центров (ТЛЦ) крупных морских портов (КМП). Отмечается, что терминальное обслуживание крупных морских судов требует применения эффективных транспортных технологий, обеспечивающих освобождение районов причальных линий и своевременный ввоз/вывоз портовых грузов, основанный на широком применении технологий регулярного грузового сообщения между районами ТЛЦ. При этом устойчивость межрайонного сообщения обеспечивается за счет комбинаций различных логистических моделей: унимодальной – использующей один вид транспорта, и интермодальной, мультимодальной, трансмодальной и амодальной моделей, реализующихся путём взаимодействия нескольких видов транспорта. Для оценки эффективности взаимодействия морского и железнодорожного транспорта в рамках УПК КМП на основе базовой модели перевозочного процесса, представленной в форме унимодальной, управляемой из единого центра модели, авторами рассматривается система «опорная станция – инфраструктура УПК – морской порт». Исследования показали, что критичной составляющей в этом случае становится не качество организации перевозочного процесса, а количественные характеристики железнодорожной инфраструктуры УПК. При этом исходя из результатов моделирования в зависимости от мощности вагонопотока и размеров партий грузов, для обеспечения устойчивой работы такой системы всегда должно выполняться условие, когда не менее 2-х путей сортировочного парка постоянно свободны. Проведенные авторами исследования, охватывающие различные возможности транспортного обслуживания приходящих и/или уходящих судов в УПК КМП, показали, что в рамках когнитивного подхода, позволяющего предложить и обосновать альтернативное решение построения базовой модели перевозочного процесса, определяющей взаимодействие морского и железнодорожного транспорта в УПК, целесообразно перейти от простой унимодальной, управляемой из единого центра модели перевозок, к сложной амодальной модели.

**Ключевые слова:** морской порт, модель перевозочного процесса, перегрузочный комплекс, транспортно-логистический центр, транспортная услуга, маршрут движения

**Для цитирования:** Котенко А.Г., Малыгин И.Г., Королев О.А. Когнитивный метод формирования модели мультимодального перевозочного процесса в универсальных перегрузочных комплексах крупных морских портов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 302—309.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.039>

## Cognitive method of forming a model of a multimodal transportation process in universal transshipment complexes of large seaports

Aleksey G. Kotenko<sup>1</sup> [algenko@gmail.com](mailto:algenko@gmail.com), Igor G. Malygin<sup>1,2</sup> [malygin\\_com@mail.ru](mailto:malygin_com@mail.ru),

Oleg A. Korolev<sup>1</sup> [korolev@iptran.ru](mailto:korolev@iptran.ru)

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences;

<sup>2</sup>St. Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia

**Abstract.** The article considers the problem of choosing the most efficient model for organizing the transportation process when moving goods within the framework of universal transshipment complexes (UTC) of transport and logistics centers (TLC) of large seaports (LS). It is noted, that the terminal service of large sea vessels requires the use of efficient transport technologies that ensure the release of berthing lines and the timely import/export of port cargo, based on the widespread use of technologies for regular cargo communication between the areas of the UTC. At the same time, the stability of inter-district communication is ensured through combinations of various logistic models: unimodal - using one mode of transport, and intermodal, multimodal, transmodal and amodal models, implemented through the interaction of several modes of transport. To assess the effectiveness of the interaction of sea and rail transport within the framework of the UTC LS based on the basic model of the transportation process, presented in the form of a unimodal model controlled from a single center, the authors consider the system "base station - infrastructure of the UTC - seaport". Studies have shown that the critical component in this case is not the quality of the organization of the transportation process, but the quantitative characteristics of the railway infrastructure of the UTC. At the same time, based on the simulation results, depending on the capacity of the car traffic and the size of the formed consignment of goods, in order to ensure the stable operation of such a system, the condition must always be met when at least 2 tracks of the marshalling yard are constantly free. The studies conducted by the authors, covering

various possibilities of transport service for incoming and/or outgoing ships in UTC LS, showed that within the framework of a cognitive approach that allows us to propose and justify an alternative solution for constructing a basic model of the transportation process that determines the interaction of sea and rail transport in the UTS, it is advisable to move from a simple unimodal, controlled from a single center of the transportation model, to a complex amodal model.

**Key words:** seaport, model of transportation process, transshipment complex, transport and logistics center, transport service, route

**For citation:** Aleksey G. Kotenko, Igor G. Malygin, Oleg A. Korolev. Cognitive method of forming a model of a multimodal transportation process in universal transshipment complexes of large seaports // Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 302—309.

### Введение

Универсальные перегрузочные комплексы (УПК) транспортно-логистических центров (ТЛЦ) крупных морских портов (КМП) являются одними из наиболее важных звеньев сферы международных мультимодальных морских транспортных услуг – как правило, на пути следования груза встречаются несколько ТЛЦ, и от технологии их работы зависит то, в каком виде, за какой срок груз дойдет до конечного потребителя, сколько финансовых затрат потребуется на реализацию определенных операций и многое другое.

Структура системы переработки грузов в ТЛЦ крупного морского порта обязательно включает такие элементы как:

- закрытые склады, оборудованные устройствами для погрузки, выгрузки и комплектации грузов;
- открытые площадки для хранения;
- железнодорожную станцию, обеспечивающую подачу вагонов непосредственно к разгрузочным площадкам;
- аэропорт или вертолетную площадку;
- разворотные площадки, площадки для ожидания разгрузки и погрузки, стоянки для автомобилей.

Особое внимание в системе переработки грузов уделяется вопросам специальной организации таможенного оформления, налаживания ремонта и эксплуатации оборудования, устранения дефектов в товарах, организации страхования и финансовых платежей, а также подготовки необходимой информации о предстоящей отправке грузов и организации контроля за ходом их движения.

Системные элементы ТЛЦ образуют четыре функционально-технологические группы: транспортную, информационную, складскую и торговую (торгово-выставочные комплексы, отделения банков и пр.).

Ядро системы – универсальный перегрузочный комплекс (УПК) – формирует элементы складской и транспортной функциональных групп. Технологии УПК направлены на создание бесперебойно работающего конвейера, связывающего в единую сеть грузовые и логистические единицы, и в этом смысле УПК является особым типом производственного предприятия, обусловленного специфическим архитектурно-планировочным

решением и определенной заранее заданной системой организации перевозочного процесса.

Исследование последнего обстоятельства в рамках комплексного когнитивного метода позволяет создать максимально эффективные условия для обеспечения большинства реализуемых в ТЛЦ КМП функций: обработки, комплектования и распределения грузов, временного размещения и хранения продукции, организации грузоперевозок, оптимизации логистики и таможенного оформления.

### Простая и смешанная модели перевозочного процесса УПК

Специфика организации перевозочного процесса в УПК определяется как особенностями взаимодействия, так и тенденциями развития видов транспорта, используемого для доставки к терминалам и обслуживания транспортных узлов ТЛЦ.

Среди главных тенденций, оказывающих влияние на организацию перевозочного процесса в УПК, нужно отметить увеличение грузоподъемности судов (дедвейт) и расширение масштабов морского линейного сервиса. Терминальное обслуживание крупных морских судов (например, контейнеровозов вместимостью до 14 тыс. ДФЭ) требует применения не только высокопроизводительного грузоподъемного оборудования, но и эффективных транспортных технологий, обеспечивающих освобождение районов причальных линий от несвойственных операций и своевременный ввоз/вывоз портовых грузов, основанный на широком применении технологий регулярного грузового сообщения между районами УПК. Это позволяет улучшить качество морского линейного контейнерного, ролкерного, паромного сервиса, повысить пунктуальность доставки грузов и, с учетом относительно низкой стоимости перевозки – высокую конкурентоспособность ТЛЦ КМП.

В общем случае устойчивость межрайонного сообщения можно обеспечить на базе комбинаций различных логистических моделей: с использованием одного вида транспорта (униmodalной), и осуществлением взаимодействия нескольких видов транспорта: интерmodalной, мультимодальной, трансmodalной и амодальной моделей, где особенности организации перевозок определяются правовыми, юридическими и техническими условиями (табл. 1).

Таблица 1

Логистические модели перевозок		
Наименование	Особенности организации	Форма реализации
Униmodalная	Перевозка груза одним видом транспорта в рамках единого фрахта по единым транспортным документам под управлением одного диспетчерского центра	«От двери» отправителя «до двери» получателя
Интерmodalная	Перевозка груза несколькими видами транспорта по разным тарифам и транспортным документам в одной грузовой единице (средстве) бесперегрузочным сообщением с распределением ответственности за груз между участниками перевозки (контейнеры, трейлеры, контрейлеры и пр.)	Организация продвижения груза по заранее согласованному с получателем жесткому графику (MRP-метод)
Мультиmodalная	Перевозка груза несколькими видами транспорта с определением основного вида транспорта (перевозчика) и дополнительных видов (клиентов основного) в рамках единого фрахта по единым транспортным документам	Организация продвижения груза под запросы получателя (заказы на услуги) с координацией действия всех участников «точно в срок» – метод быстрого реагирования
Трансmodalная	Перевозка груза несколькими видами транспорта по единым транспортным документам бесперегрузочным сообщением	Организация продвижения груза по заранее сформированному жесткому графику (MRP-метод)
Аmodalная	Перевозка груза различными видами транспорта по определенному маршруту, контролируемому из одного диспетчерского центра в рамках единого фрахта по единым транспортным документам	Сочетание организации движения груза по сформированному жесткому графику с заказами на услуги и координацией действий всех участников (сочетание MRP-метода и метода быстрого реагирования)

Вместе с тем для УПК КМП, где униmodalная организация перевозок не является определяющей (как правило, вид транспорта, используемого для подвоза, и транспорта, используемого для развоза, разный), в ходе разработки технологических решений с позиций когнитивности удобно оперировать определениями двух моделей перевозочного процесса:

1) простой модели, в которой взаимодействуют не более 2-х видов транспорта, например, морской обеспечивает подвоз, а автомобильный (или, скажем, трубопроводный) – развоз (распределение) груза;

и  
2) сложной (смешанной) модели, реализуемой при взаимодействии 3-х и более видов транспорта.

Простая модель перевозочного процесса может применяться для организации в складских терминалах и транспортных узлах двухвидовых маршрутов, где промежуточные операции по складированию и грузопереработке минимизированы и для любых грузов обычно не

превышают двух. Недостатком простой модели может стать то, что в ходе ее реализации часто возникает необходимость осуществления дополнительных операций по складированию, хранению, укрупнению и разукрупнению партий грузов.

Сложная или смешанная модель перевозочного процесса реализуется при последовательном использовании в рамках УПК нескольких (более 2-х) видов транспорта, причем в рамках одного маршрута движения. Сложные виды маршрутов, как правило, связаны с контейнерными способами хранения и составляют основу развития партионных грузовых перевозок.

Очевидно, что для обеспечения высокой производственной активности в рамках смешанной модели перевозочного процесса могут применяться различные логистические модели. Подчиняясь принципам синхронизации и параллельности осуществления операций, на площадях УПК КМП они могут комбинироваться, обеспечивая различные характеристики перевозок (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики перевозок							
Логистическая модель	Применение разных видов транспорта	Единый тариф	Единый транспортный документ	Возможность перегрузки	Управление из единого центра	Возможность применения жесткого графика	Возможность использования методов быстрого реагирования
Униmodalная	-	+	+	-	+	-	-
Интерmodalная	+	-	-	-	-	+	-
Мультиmodalная	+	+	+	+	-	-	+
Трансmodalная	+	-	+	-	-	+	-
Аmodalная	+	+	+	+	+	+	+

**Базовая модель перевозочного процесса УПК КМП**

Исходя из реализуемых параметров УПК, включающих:

- общую концепцию складов и их целевую аудиторию,
- оценку грузооборота,
- определение оптимальной инфраструктуры (подъездных путей, расположение доков, размещение зон внутри складов, путей перемещения персонала и техники, движение входящих и исходящих грузовых потоков и пр.),
- определение внутреннего зонирования участков,
- расчет количества и размещения необходимого оборудования (на основе использования весовых и габаритных характеристик грузов, прогноза грузооборота, принципов организации зон),

- расчет объемно-планировочных решений (расчет складской площади, оценка вариантов организации складов),
  - расчет необходимого количества погрузочной техники и ее типов (на основе оценки различных технологий хранения, источников питания),
  - расчет необходимого количества персонала,
  - оценку параметров транспортных потоков,
- в рамках УПК, двигаясь в русле когнитивного подхода, целесообразно устанавливать базовую (простую или смешанную) модель перевозочного процесса. Причем в последнем случае – с расшифровкой характеристик, например: смешанная, управляемая из единого центра, или смешанная децентрализованная с организацией жесткого графика (табл. 3). Характеристики базовой модели определяют особенности тарификации и возможности перегрузки, однако, схемы документообеспечения подчиняются требованиям логистических моделей.

Таблица 3

**Характеристики базовой модели перевозочного процесса**

Модель перевозочного процесса	Тарифно-правовые особенности – логистическая модель	Централизация управления	Организация жесткого графика	Организация быстрого реагирования
Простая	Униmodalная	Да	Нет	Нет
Смешанная	Интерmodalная	Нет	Да	
	Мультиmodalная		Нет	Да
	Трансmodalная		Да	Нет
	Аmodalная	Да	Да	Да

Определение базовой модели перевозочного процесса УПК на стадиях подготовительного, технологического и архитектурно-строительного проектирования при строительстве или реконструкции ТЛЦ КМП с использованием когнитивного метода позволяет добиться оптимального распределения площадей между открытыми и закрытыми складами (рекомендуемая доля – 20-30%), комбинированными терминалами (приблизительно 35%), подъездными путями и районами маневровой работы с площадками для маневрирования (до 15%), а также рассчитать оптимальную площадь территории морского порта.

В итоге базовая модель перевозочного процесса рассматривается как один из факторов установления или изменения границ территории морского порта и регулирования классности как зон участков УПК, так и ТЛЦ в целом.

За исключением класса А++ (роботизированный склад высотой от 28 метров, где приемка/отправка груза не превышает 5 минут до 100% без участия человека), классы А+, А, В+ подчиняются критериям по площади застройки – 40-45% (45-55% в случае класса В+), близости к причальным линиям морского порта, основным центральным авто- и железнодорожным магистралям, наличия площадок для стоянки, парковки и маневрирования большегрузных автомобилей и железнодорожных парков, а также критериям к конструкциям складских зданий с расстоянием между пролетами не менее 24 метров, высотой потолков – не менее 13 метров (не менее 10 м в случае класса А и не менее 8 метров

для класса В+), позволяющих обеспечить многоуровневое стеллажное хранение и регулируемый температурный режим. И хотя архитектурно-строительные требования к зонам участков ТЛЦ КМП классов В, С и D существенно ниже (класс D – подвальные или неотопливаемые помещения или ангары), критерии по обеспечению их транспортной инфраструктурой остаются на максимально возможном уровне.

Вместе с тем, опыт показывает, что ввиду изменчивости архитектурно-планировочных решений ТЛЦ и параметров УПК, базовая модель перевозочного процесса требует многостадийной вариантной проработки и разработки когнитивных процедур оценки эффективности на разных стадиях.

**Подход к разработке когнитивной процедуры оценки эффективности базовой модели перевозочного процесса УПК на стадии взаимодействия «морской порт – железная дорога»**

Одним из проблематичных элементов базовой модели перевозочного процесса УПК КМП является организация перевозок железнодорожным транспортом, который в силу своих инерционных качеств в ряде случаев может становиться дестабилизирующим фактором работы [1].

В ходе оценки эффективности базовой модели перевозочного процесса, определяющей взаимодействие морского и железнодорожного транспорта в УПК, в рамках когнитивного метода удобно принять следующие допущения:

морской порт рассматривается в качестве получателя услуги по перевозке, а железнодорожный транспорт – в качестве перевозчика;

деятельность железнодорожного транспорта в рамках УПК рассматривается как деятельность внутреннего перевозчика через станцию, находящуюся в морском порту, а за пределами УПК – как внешнего (ввиду наличия связи между УПК и железнодорожной магистралью) через станцию, находящуюся на магистрали (далее – опорную станцию);

морской порт является основным (главным), но не единственным заказчиком перевозки (поскольку железнодорожная инфраструктура УПК несет нагрузку по приёму и переработке поездов, прибывающих не только в адрес порта, но и в адрес других предприятий, обслуживаемых ТЛЦ КМП, а также формированию и отправлению всех поездов).

На первый взгляд, речь идет об организации унимодальной, управляемой из единого центра модели перевозок (табл. 4).

Таблица 4

**Исходные характеристики взаимодействия «морской порт – железная дорога» в УПК КМП**

Базовая модель перевозочного процесса	Логистическая модель	Централизация управления	Форма реализации	Логистическая цепочка
Простая	Унимодальная	Управление из единого центра	От двери – до двери по заранее согласованному жесткому графику	Морской порт – железнодорожная инфраструктура УПК – Опорная станция

Условием обеспечения эффективности такой модели является устойчивость работы подсистемы «опорная станция – инфраструктура УПК – морской порт». Эта характеристика позволяет соблюсти как нормы простота вагонов, так и минимизировать простоя судов под грузовой обработкой при обслуживании железной дорогой. Теоретически достичь такой устойчивости можно за счет моделирования мощности парков путей в УПК: как приемоотправочных, так и сортировочных, сосредоточиваясь на устойчивости работы парков.

Поскольку качество работы подсистемы «опорная станция – парк – морской порт» определяется своевременностью отправления готовых составов из парков и равномерностью их подвода к паркам, режимом соблюдения технологического процесса и объемом переработки, основным условием устойчивости работы парков становится равенство выходящего вагонопотока входящему:

$$n_{отп} = n_{пр}, \text{ где}$$

$$n_{отп} = N_n^{omn} n_c^{omn}, \quad n_{пр} = N_n^{np} n_c^{np},$$

где  $n_{отп}$ ,  $n_{пр}$  – общее количество отправляемых и прибывающих вагонов;  $N_n^{отп}$ ,  $N_n^{пр}$  – количество отправляемых и прибывающих поездов;  $n_c^{отп}$ ,  $n_c^{пр}$  – количество вагонов в составе отправляемых и прибывающих поездов.

Из условия устойчивости работы парков следует, что работа подсистемы взаимодействия поддается управлению путем изменения числа поездов и варьирования их составности, например, число отправляемых поездов может быть меньше, чем прибывших  $N_n^{отп} < N_n^{пр}$ , при условии, что составы отправляемых поездов длиннее, чем составы прибывших  $n_c^{отп} > n_c^{пр}$ , и наоборот. Тогда, устойчивость работы парков определяется характеристиками инфраструктуры, а именно наличием числа путей, в том числе, резервных [2].

При недостаточной мощности железнодорожных парков КМП в условиях неравномерности обработки и продвижения вагонопотока возникает опасность значительных межоперационных простоев, увеличения оборота вагонов, снижения

перерабатывающей способности железнодорожной инфраструктуры и повышения себестоимости перевозок. Кроме того, недостаток приемоотправочных путей приводит к задержкам грузопотока на подходах к ТЛЦ и непроизводительному простоя вагонов на близлежащих железнодорожных отдельных пунктах, а недостаток сортировочных путей – к несвоевременному формированию/расформированию судовых партий и перепростоя судов под грузовой обработкой.

В общем случае расчет мощности парков производится в соответствии с принятыми правилами проектирования станций и узлов на железных дорогах. В ходе моделирования мощность приемоотправочного парка определяется числом путей  $m_{поп}$ , сортировочного –  $m_{сп}$ .

Предполагается, что если приемоотправочный парк имеет часть занятых путей  $m_{поп}^3$ , составы принимаются только на свободные пути  $m_{поп}^c$ :

$$m_{поп} = m_{поп}^c + m_{поп}^3,$$

и только те составы, которые предназначены для расформирования (по судовым партиям или на терминалы).

Если состав полностью соответствует одной судовой партии или предназначен на один терминал, считается, что он не нуждается в переработке и должен быть отправлен сразу на отдельный путь сортировочного парка или терминала.

Очевидно, что при большом числе судовых партий в составе число путей  $m_{сп}$  сортировочного парка может становиться критичным. Следовательно, число путей  $m_{сп}$  должно устанавливаться в зависимости от (назначений)  $G$ , то есть от возможного числа судовых партий и групп вагонов, направляемых на терминалы.

При занятости всех путей в парках  $m_{поп} = m_{поп}^3$ ,  $m_{сп} = m_{сп}^3$  прием грузов под переработку железнодорожным транспортом в УПК невозможен.

Процедуры моделирования мощности парков строятся на том, что любое событие в парках можно рассматривать, как совершаемое с определенной вероятностью или имеющее вероятностные параметры (количественные, качественные,

временные и др.) [3,4]. Вероятность  $P(A)$  появления составов поездов из  $g$ -групп при  $G$  назначениях, устанавливаемая для сортировочного парка, выражается формулой:

$$P(A) = \frac{\binom{G+g-1}{g}}{\binom{G+G-1}{G} - G}$$

где  $\binom{G+g-1}{g}$ ,  $\binom{G+G-1}{G}$  – биномиальные коэффициенты.

Результаты моделирования и проверка условия устойчивости работы парков и в целом подсистемы «опорная станция – парки – морской порт» показывают, что характер изменения числа групп (прежде всего – судовых партий) в поступающих составах имеет экспоненциальный характер (рис. 1). При этом, как видно из рисунка 1 вероятность нахождения в составе 2-х партий достаточно мала. Как правило, судовых партий в составе больше.

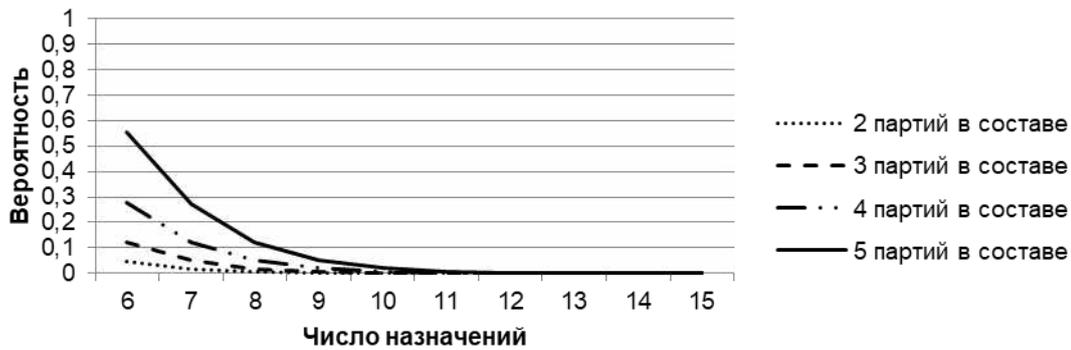


Рис. 1. Характер изменения числа групп в поступающих составах

Таким образом, оценка эффективности взаимодействия морского и железнодорожного транспорта в УПК КМП на основе базовой модели перевозочного процесса, представленной в форме унимодальной, управляемой из единого центра модели, показывает, что критичной составляющей в этом случае становится не качество организации перевозочного процесса, а количественные характеристики железнодорожной инфраструктуры УПК.

Действительно, исходя из результатов моделирования при допущении, что пути в сортировочном парке в ходе эксплуатации обычно находятся либо в состоянии частичной свободности  $m_{сп}^{чс}(l)$ , либо полной занятости  $m_{сп}^{пз}$  в зависимости от мощности вагонопотока данного назначения и размеров формируемой партии:

$$m_{сп} = m_{сп}^{чс}(l) + m_{сп}^{пз}$$

должно соблюдаться условие: при полном освобождении путей в приемоотправочном парке  $m_{пп}^c = \{1, 2, 3, \dots, m_{пп}\}$  и  $m_{по}^c = \{1, 2, 3, \dots, m_{по}\}$ , и частичной свободности или занятости путей

сортировочного парка, в сортировочном парке всегда должно быть полностью свободно  $m_{сc}^c$  не менее 2-х путей:

$$m_{сc}^c = m_{пп}^c + \sum m_{сп}^{чс}(l) + m_{по}^c \geq 2$$

Соблюдение последнего условия при неравномерности динамики занятости путей в парках требует значительных резервов железнодорожной инфраструктуры УПК, становясь узким местом в работе ТЛЦ КМП.

Вместе с тем когнитивный подход позволяет предложить и обосновать другое решение для построения базовой модели перевозочного процесса, определяющей взаимодействие морского и железнодорожного транспорта в УПК. Комплексные исследования, охватывающие различные возможности транспортного обслуживания приходящих и/или уходящих судов, показывают целесообразность перехода в рамках УПК от простой унимодальной, управляемой из единого центра модели перевозок (табл. 4), к сложной амодальной модели перевозочного процесса (табл. 5).

Таблица 5

Результатирующие характеристики взаимодействия «морской порт – железная дорога» в УПК

Базовая модель перевозочного процесса	Логистическая модель	Централизация управления	Форма реализации	Особенности организации
Сложная	Амодальная в цепочке «Опорная станция – железнодорожная инфраструктура УПК – морской порт»	Управление из единого центра	Сочетание организации движения груза по жесткому графику с организацией движения под запросы и координацией действий всех участников «точно в срок» (сочетание MRP-метода и метода быстрого реагирования)	Перевозка груза различными видами транспорта по определенному маршруту, контролируемому из одного диспетчерского центра в рамках единого фрахта по единым транспортным документам

В этом случае железнодорожная инфраструктура при наступлении форс-мажорных обстоятельств или переходе ТЛЦ КМП к состоянию развития перестает быть блокирующим фактором, поскольку и опорная станция и морской порт могут осуществлять взаимодействие либо напрямую, минуя парки путей УПК, либо с использованием более сложных цепочек, опять таки минуя парки УПК, на основе применения автомобильного, трубопроводного или авиа транспорта параллельно работе железнодорожного, под эгидой единого внутреннего перевозчика – железной дороги.

### Заключение

В основе системы обработки, комплектования, временного размещения, хранения и распределения грузов на территории любого транспортно-логистического центра крупного морского порта лежит технология работы универсального перегрузочного комплекса. Одной из главных составляющих такой технологии является система организации перевозочного процесса между морским портом и различными районами транспортно-логистического центра. Установление оптимальных характеристик перевозочного процесса для организации рационального межрайонного взаимодействия в транспортно-логистическом центре становится важным элементом налаживания работы универсального перегрузочного комплекса.

Опыт показывает, что комплексное применение когнитивного метода позволяет определять требуемые характеристики организации перевозок в различных звеньях УПК на разных стадиях развития транспортно-логистических центров.

Основным понятием в рамках когнитивных исследований является модель перевозочного процесса в универсальном перегрузочном комплексе. При этом, поскольку учесть все возможные условия перевозок невозможно, в ходе исследований рассматривается базовая модель перевозочного процесса, которая в соответствии с когнитивным подходом характеризуется прежде всего тарифно-правовыми особенностями организации перевозок, степенью централизации управления и формой реализации перевозок.

Роль базовой модели перевозочного процесса может быть достаточно велика, поскольку принятая в рамках конкретных условий работы универсального перегрузочного комплекса, она становится одним из факторов, влияющих на установление или изменение границ территории крупного морского порта и регулирование классности как зон участков УПК, так и ТЛЦ КМП в целом.

Вместе с тем, ввиду изменчивости архитектурно-планировочных решений транспортно-логистических центров и параметров универсальных перегрузочных комплексов, базовая модель перевозочного процесса требует постоянной многостадийной вариативной проработки и применения когнитивных процедур оценки эффективности на разных стадиях.

Примеры использования таких процедур показывают нетривиальность результатов полученных характеристик, что позволяет оптимизировать процессы перевозок в универсальном перегрузочном комплексе на новой основе.

### Литература

1. Котенко А.Г., Соляник В.В. Оценка качества переработки вагонопотока в условиях неравномерности прибытия поездов на сортировочную станцию // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 397–406. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-397-406.
2. Иванкова Л.Н., Буракова А.В. Определение пропускной способности станций с учетом емкости путевого развития // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 59, №3. – С. 92–98. – DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).92-98.
3. Терещенко О.А. Моделирование процессов накопления вагонов для решения задач оперативного планирования в условиях неопределенности исходной информации // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – №3(69) – С. 45–55.
4. Жарков М.Л., Пavidис М.М. Моделирование сортировочных станций железнодорожной сети методами теорий массового обслуживания // Надежность. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 27–34. – DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-3-27-34.

### References

1. Kotenko A.G., Solyanik V.V. Otsenka kachestva pererabotki vagonopotoka v usloviyakh neravnomernosti pribytiya poyezdov na sortirovochnuyu stantsiyu [Quality assessment of yard operation under the conditions of irregularity of train arrival at the marshaling yard] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya. – SPb.: PGUPS, 2020. – T. 17. – Vyp. 3. – S. 397–406. DOI: 10.20295/1815-588KH-2020-3-397-406.
2. Ivankova L.N., Burakova A.V. Opredeleniye propusknoy sposobnosti stantsiy s uchetom yemkosti putevogo razvitiya [Determination of carrying capacity of stations taking into account the length of the railway tracks] // Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye. – 2018. – T. 59, №3. – S. 92–98. – DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).92-98.
3. Tereshchenko O.A. Modelirovaniye protsessov nakopleniya vagonov dlya resheniya zadach operativnogo planirovaniya v usloviyakh neopredelennosti iskhodnoy informatsii [Simulation of cars accumulation processes for solving tasks of operational planning in conditions of initial information uncertainty] // Nauka ta progres transportu. – 2017. – №3(69) – S. 45–55.
4. Zharkov M.L., Pavidis M.M. Modelirovaniye sortirovochnykh stantsiy zheleznodorozhnoy seti metodami teorii massovogo obsluzhivaniya [Simulation of railway marshaling yards using the methods of the queueing theory] // Nadezhnost'. – 2021. – T. 21, № 3. – S. 27–34. – DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-3-27-34.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Алексей Геннадьевич Котенко**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем организации транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: algenko@gmail.com

**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

**Олег Александрович Королев**, научный сотрудник лаборатории проблем безопасности транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13. Тел. +7(812) 323-29-54, e-mail: korolev@iptran.ru

**Aleksey G. Kotenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Head of the Laboratory of the organization of transport systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: algenko@gmail.com

**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

**Oleg A. Korolev**, researcher of the Laboratory of vehicle safety systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812)323-29-54, e-mail: korolev@iptran.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.08.2022.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING, AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 539.374

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.040>

### Влияние предварительного подогрева пластины на значения и распределение остаточных напряжений, образованных в результате наплавки

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.** Работа посвящена построению математической модели процесса электродуговой наплавки на поверхность стальной пластины. Материал пластины принимается упруго-пластическим, деформации малыми и состоящими из упругих и пластических. Обратимые (упругие) деформации связаны с напряжениями законом Дюамеля-Неймана, необратимые (пластические) зарождаются и растут благодаря пластическому течению в рамках ассоциированного закона пластического течения. Упругие модули и предел текучести полагаются зависящими от температуры. В качестве условия пластического течения выбрано условие Мизиса, в котором учтена способность металла сопротивляться необратимой деформации (вязкость). Исследуется влияние предварительного равномерного подогрева стальной пластины на величину остаточных напряжений в ней. Приводится зависимость остаточных напряжений, расположенных в материале пластины, от величины предварительного температурного подогрева. В результате делается вывод о том, что достаточно равномерно прогреть пластину до 200 °С – 250 °С, чтобы снизить значения максимальных напряжений до благоприятного уровня.

**Ключевые слова:** наплавка, температурные напряжения, пластичность, упругость, пластина.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Хабаровского Федерального научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук № 075-00742-22-00, с использованием ресурсов ЦКПН «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемых Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 075-15-2021-663.

**Для цитирования:** Абашкин Е.Е., Ткачева А.В. Влияние предварительного подогрева пластины на значения и распределение остаточных напряжений, образованных в результате наплавки, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 310—318.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.040>

### 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 work is devoted to the construction of a mathematical model of the process of electric arc surfacing on the surface of a steel plate. The plate material is assumed to be elastic-plastic, deformations are small and consist of elastic and plastic. Reversible (elastic) deformations are related to stresses by the Duhamel-Neumann law, irreversible (plastic) deformations arise and grow due to plastic flow within the framework of the associated plastic flow law. The elastic moduli and yield strength are assumed to be temperature dependent. The Mises condition was chosen as the plastic flow condition, which takes into account the ability of the metal to resist irreversible deformation (viscosity). The influence of preliminary uniform heating of a steel plate on the value of residual stresses in it is investigated. The dependence of residual stresses located in the plate material on the value of preliminary temperature heating is given. As a result, it is concluded that it is sufficient to heat the plate evenly up to 200 °C - 250 °C in order to reduce the values of maximum stresses to a favorable level.

**Key words:** surfacing, thermal stresses, plasticity, elasticity, plate

**Financial Support:** The work was carried out within the framework of the state task of the Khabarovsk Federal Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences No. 075-00742-22-00, using the resources of the Center for Scientific Data Processing and Storage of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project No. 075-15-2021-663.

**For citation:** Evgeny E. Abashkin, Anastasia V. Tkacheva, Study of Local Combined Heat Impact on Permanent Joints, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 310—318.

### Введение

Технологию наплавки применяют для восстановления и ремонта изношенных деталей, а также при изготовлении новых деталей с целью получения поверхностного слоя, обладающего повышенными эксплуатационными и физико-механическими свойствами материала. Этот процесс позволяет увеличить срок службы деталей и уменьшить расход дефицитных материалов при их производстве.

Существуют различные технологии проведения наплавки, такие как электродуговая, плазменная, электрошлаковая, электро-лучевая, индукционная, лазерная и наплавка трением. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Из выше перечисленных технологий, дуговая наплавка электродной проволокой наиболее распространена, и востребована из-за легкости и мобильности применения и недорогих расходных материалов [1-4].

При данном способе локальное тепловое воздействие электрической дуги нагревает металл до температуры плавления в зоне контакта, образуется подвижная сварочная ванна. В передней части ванны основной металл расплавляется и перемешивается с электродным металлом, а в хвостовой части происходят кристаллизация расплава и образование наплавленного слоя. При остывании в точке наплавления металла появляются высокие остаточные напряжения и деформации, что свою очередь приводит к снижению эксплуатационных свойств и качества материала. Для борьбы с негативными последствиями применяют ряд технических приемов, один из которых предварительный подогрев детали перед наплавкой. Прогрев позволяет снизить скорость остывания наплавленного слоя. Замедление остывания предотвращает формирование хрупких структур и удаляет диффузный водород, что, в свою очередь, предотвращает холодное растрескивание наплавленного материала, уменьшает уровень остаточных напряжений. Дополнительные процедуры приводят к увеличению трудозатрат и себестоимости процесса. Поэтому определение оптимальной температуры предварительного подогрева, при которой будет достигаться наилучшее качество наплавленного слоя, приведет к снижению получаемых затрат.

Технологию наплавки модернизируют как экспериментально [5-7], так и теоретически используя математический аппарат [8-12].

Математическое моделирование процесса наплавки позволяет оптимизировать данную технологию, не прибегая к длительным и дорогостоящим экспериментам. Достаточно однократно построить корректную математическую модель исходя из механического поведения исследуемого предмета для того, чтобы в дальнейшем анализировать влияние разных физических факторов.

Данная работа направлена на построение математической модели технологического процесса дуговой наплавки на стальную подложку, чтобы изучить влияние температуры подогрева подложки на уровень остаточных напряжений, перед началом локального теплового воздействия. Требование к

подогреву стальной подложки составляет 500 °С, чтобы не допустить возникновения твердотельных фазовых превращений в металле.

### Основа математической модели

Предполагаем, что с начало в пластине отсутствуют необратимые деформации. Деформации считаем малыми  $d_{ij}$  и складываемыми из обратимых  $e_{ij}$  и необратимых  $p_{ij}$  [13].

$$d_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}) = e_{ij} + p_{ij} \quad (1)$$

Напряжения, упругую деформацию и температуру связывает соотношение Дюамеля-Неймана

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

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

При высоких температурах упругие модули зависят от температуры, что подтверждается экспериментально [14-19]. Для нашего случая применяем их линейную зависимость.

$$E(x, y, z, t) = E_p - (E_p - E_0)\theta(x, y, z, t), \\ \nu(x, y, z, t) = 0.5 - (0.5 - \nu_0)\theta(x, y, z, t), \quad (3)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \theta = (T_p - T)(T_p - T_0)^{-1}$$

В (3)  $E_0$  – модуль Юнга при комнатной температуре  $T_0$ ,  $E_p$  – при температуре плавления  $T_p$ ,  $\nu_0$  – коэффициент Пуассона при комнатной температуре. После начала процесса остывания в связи с фазовыми твердотельными превращениями упругие модули  $\nu_0$  фиксируют свои значения  $E_0'(x)$  и  $\nu_0'(x)$ , этим мы моделируем фазовые переходы.

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

$$\varepsilon_{ij}^p = dp_{ij} = d\phi \frac{\partial f(\sigma_{ij}, \eta)}{\partial \sigma_{ij}} \quad d\phi > 0 \quad (4)$$

В качестве поверхности нагружения примем условие пластического течения Мизеса

$$(\sigma_{ij} - \eta \varepsilon_{ij}^p)(\sigma_{ij} - \eta \varepsilon_{ij}^p) = k^2 \quad (5)$$

где  $k$  – предел текучести, зависящий от температуры  $k = k_0 \theta^2$ , при  $T = T_p$   $k = 0.01$  Па,  $\eta$  – задает вязкие свойства материала [20].

Дополняет систему уравнений (1,2,4,5) уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (6)$$

Граничные условия моделируют свободную поверхность, в качестве начальных условий

механической задачи примем температуру пластины в свободном состоянии равной заданной  $T_0 = 20^\circ \text{C}$ .

**Постановка задачи**

При температуре  $T^*$  на пластину (рис.1) толщиной  $h$ , с помощью электродугового процесса наплавляется слой металла толщиной  $h_1$  со скоростью  $V$ . После остывания соединения пластина с наплавом становится неразделимым. Теперь следует рассчитать остаточные напряжения и деформации в подложке пластины. Разделим поставленную задачу на две: температурную и механическую и решим их в данной последовательности. Введем допущения, связанные консолидацией и диффузией жидкого металла, их мы не учитываем. Предполагаем, что наплавляемый слой по химическому составу от основного металла не отличается.

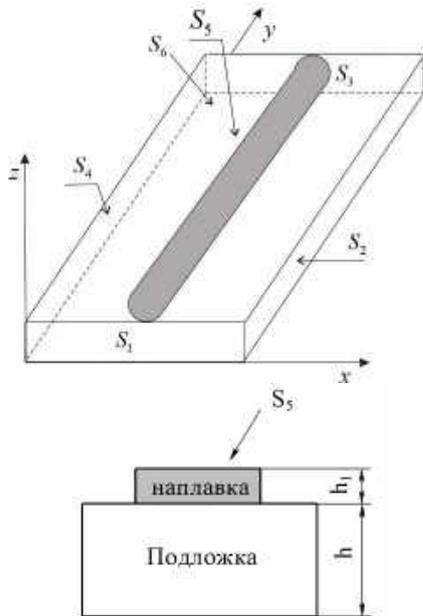


Рис. 1. Схема наплавки

**Температурная задача**

Расположим край пластины в центре декартовой системы координат  $(x, y, z)$ . Температура  $T(x, y, z, t)$  распространяется по материалу пластины согласно закону теплопроводности:

$$\rho c T_{,t} = a(T_{,xx} + T_{,yy} + T_{,zz}), \quad (7)$$

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

Начальные и граничные условия, задаваемые на поверхностях пластины:

$$\begin{aligned} t = 0 : T &= T^* ; \\ t > 0 : aT_{,y}|_{S_1, S_3} &= k(T_0 - T), \\ aT_{,x}|_{S_2, S_4} &= k(T_0 - T), \quad aT_{,z}|_{S_5} = k(T_0 - T), \\ T_0 &= 20^\circ \text{C} \end{aligned} \quad (8)$$

$$aT_{,z}|_{S_5} = q + \kappa \cdot (T_0 - T) + \varepsilon \rho (T_0^4 - T^4), \text{ при } t < t^*$$

$$q = \eta IU; \text{ при } t^* \leq t, q = 0;$$

$$aT_{,z}|_{S_5} = \kappa \cdot (T_0 - T) + \varepsilon \rho (T_0^4 - T^4),$$

$q = \eta IU$ ,  $\eta$  – к.п.д. источника,  $I$  – сила тока,  $U$  – напряжение источника тока,  $\kappa$  – коэффициент теплообмена металла с окружающей средой,  $\kappa^*$  – коэффициент теплообмена металла и шлаковой корки,  $\varepsilon$  – приведенная степень черноты,  $\rho = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вм}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $V$  – скорость источника,  $L = Vt$  – место источника,  $S_i, i = 1..6$  площадки, изображенные на рис. 1,  $t^* = D_y / V$  время прекращения наплавки  $q = 0$ ,  $D_y$  – длина пути.

Распределение температуры в материале пластины в любой момент времени (вплоть до остывания) считаем известным, полученным в результате численного решения температурной задачи (7), (8) методом прогонки, поэтому переходим к описанию механической задачи.

**Механическая задача**

В начальный момент времени пластина деформируется упруго и необратимые деформации в ней отсутствуют. Полные деформации запишем в виде

$$\begin{aligned} d_{xx} &= u_{x,x}, \quad d_{yy} = u_{y,y}, \quad d_{zz} = u_{z,z}, \\ d_{xz} &= 0.5(u_{x,z} + u_{z,x}), \quad d_{yz} = 0.5(u_{y,z} + u_{z,y}), \\ d_{xy} &= 0.5(u_{x,y} + u_{y,x}) \end{aligned} \quad (9)$$

где  $u_x = u_x(x, y, z)$ ,  $u_y = u_y(x, y, z)$ ,  $u_z = u_z(x, y, z)$  функции перемещений в материале пластины.

С ростом температуры в материале появляются напряжения, которые связаны с перемещениями законом Дюамеля-Неймана (2). При достижении напряжений поверхности нагружения (5), иными словами выполнения условия пластического течения, в материале станут зарождаться и развиваться необратимые деформации. Перепишем закон Дюамеля-Неймана с учетом необратимых деформаций.

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu)(u_{x,x} - p_{xx}) + \\ &+ \lambda(u_{y,y} + u_{z,z} - p_{yy} - p_{zz}) - 3\alpha K(T - T_0); \\ \sigma_{yy} &= (\lambda + 2\mu)(u_{y,y} - p_{yy}) + \\ &+ \lambda(u_{x,x} + u_{z,z} - p_{xx} - p_{zz}) - 3\alpha K(T - T_0); \\ \sigma_{zz} &= (\lambda + 2\mu)(u_{z,z} - p_{zz}) + \\ &+ \lambda(u_{x,x} + u_{y,y} - p_{xx} - p_{yy}) - 3\alpha K(T - T_0); \\ \sigma_{xz} &= \mu(u_{x,z} + u_{z,x}) - 2\mu p_{xz}; \\ \sigma_{yz} &= \mu(u_{y,z} + u_{z,y}) - 2\mu p_{yz}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sigma_{xy} = \mu(u_{y,x} + u_{x,y}) - 2\mu\rho_{xy};$$

Необратимые деформации находятся из ассоциированного закона пластического течения и условия (5).

$$\begin{aligned} \rho_{xx} &= \frac{(2\sigma_{xx} - \sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{\Sigma} d\xi \Delta t + \tilde{\rho}_{xx}; \\ \rho_{yy} &= \frac{(2\sigma_{yy} - \sigma_{xx} - \sigma_{zz})}{\Sigma} d\xi \Delta t + \tilde{\rho}_{yy}; \\ \rho_{zz} &= \frac{(2\sigma_{zz} - \sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{\Sigma} d\xi \Delta t + \tilde{\rho}_{zz}; \\ \rho_{xz} &= \frac{12\sigma_{xz}}{\Sigma} d\xi \Delta t + \tilde{\rho}_{xz}; \\ \rho_{yz} &= \frac{12\sigma_{yz}}{\Sigma} d\xi \Delta t + \tilde{\rho}_{yz}; \\ \rho_{xy} &= \frac{12\sigma_{xy}}{\Sigma} d\xi \Delta t + \tilde{\rho}_{xy}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Sigma = \sqrt{\frac{3}{2} \left( (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2) \right)}$$

$$d\xi = \frac{1}{\eta} \left( \frac{1}{k} \Sigma - 1 \right)$$

$\tilde{\rho}_{xx}, \tilde{\rho}_{yy}, \tilde{\rho}_{zz}, \tilde{\rho}_{xy}, \tilde{\rho}_{xz}, \tilde{\rho}_{yz}$  – необратимые деформации на предыдущем временном шаге.

Уравнение равновесия в рассматриваемом случае состоит из трех соотношений

$$\begin{aligned} \sigma_{xx,x} + \sigma_{xy,y} + \sigma_{xz,z} &= 0, \\ \sigma_{yx,x} + \sigma_{yy,y} + \sigma_{yz,z} &= 0, \\ \sigma_{zx,x} + \sigma_{zy,y} + \sigma_{zz,z} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Решается полученная система уравнений (10)-(12) численно. На исследуемую область наносится прямоугольная сетка, для каждого узла в зависимости от принадлежности его к пространству в разностном виде записывается система уравнений равновесия в перемещениях. В качестве граничных условий принимается условие свободной поверхности, то есть равенство нормальных и касательных напряжений равно нулю. Сначала находятся перемещения из решения уравнения равновесия, после на основе их значения определяются напряжения и необратимые деформации. Для решения разностной системы линейных уравнений, возможно, использовать различные численные методы, но в данном случае решение определялось итерационно методом Зейделя.

### Результаты

Рассмотрим стальную пластину, обладающую следующими физико-механическими характеристиками материала: плотность

$\rho = 781 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость  $c = 500 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ , коэффициент теплопроводности  $a = 67.8 \text{ Вт/(мК)}$ , коэффициент теплообмена  $7.6 \text{ Вт/(мК)}$ , приведенная степень черноты 0.6, 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, коэффициент линейного расширения  $11.1 \cdot 10^{-6}$

, предел текучести при комнатной температуре

$k_0 = 260 \text{ МПа}$ . Толщина пластины 0.01 м, размеры

0.3 м на 0.25 м. Пусть источник тепла имеет следующие характеристики: скорость 15 м/ч, к.п.д.

источника 90, сила тока 300 А, напряжения источника

тока 35 В. Для исследований температуру подогрева

примем в диапазоне от 50 до 500 °C с шагом 50. На

рис. 2-4 показаны распределения температур в

материале пластины в моменты наплава и

прекращения наплава для трех случаев.

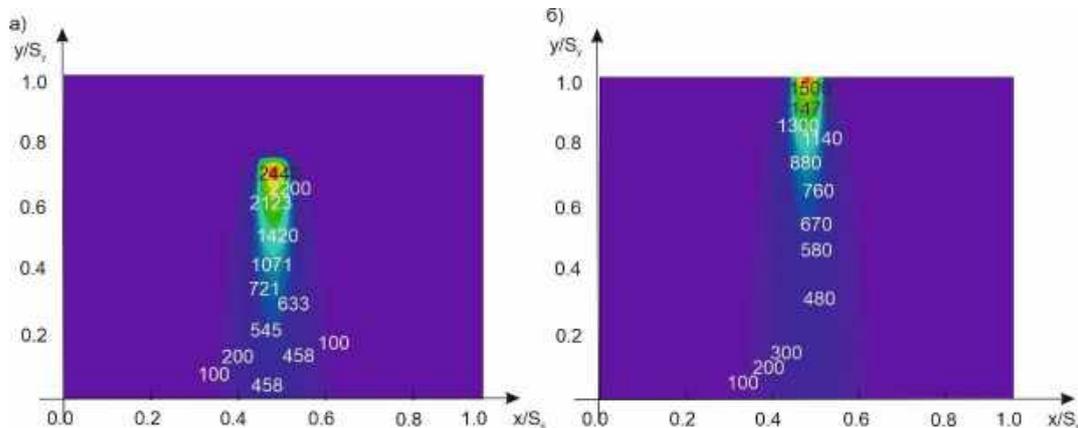


Рис. 2. Распределение температур в материале пластины без предварительного подогрева в момент наплава (а) и в момент прекращения наплава (б).

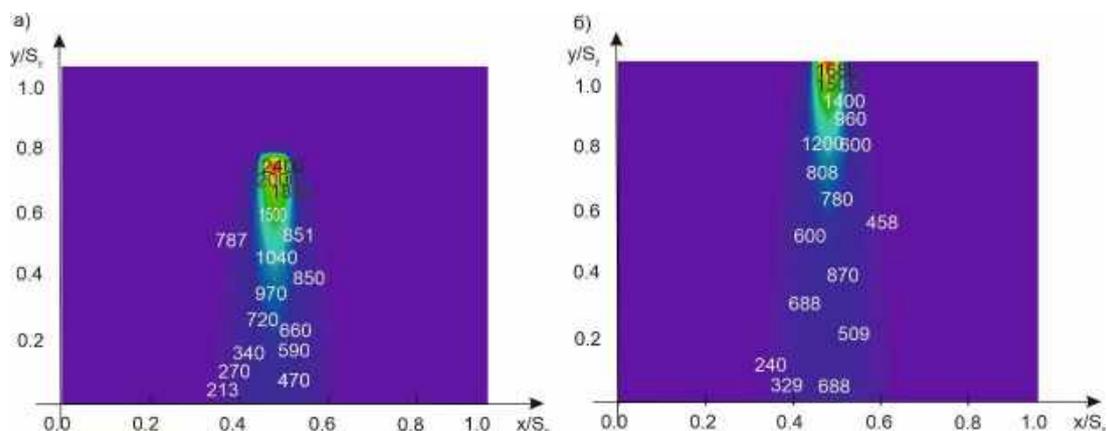


Рис. 3. Распределение температур в материале пластине при предварительном нагреве 150 °С в момент наплава (а) и в момент прекращения наплава (б).

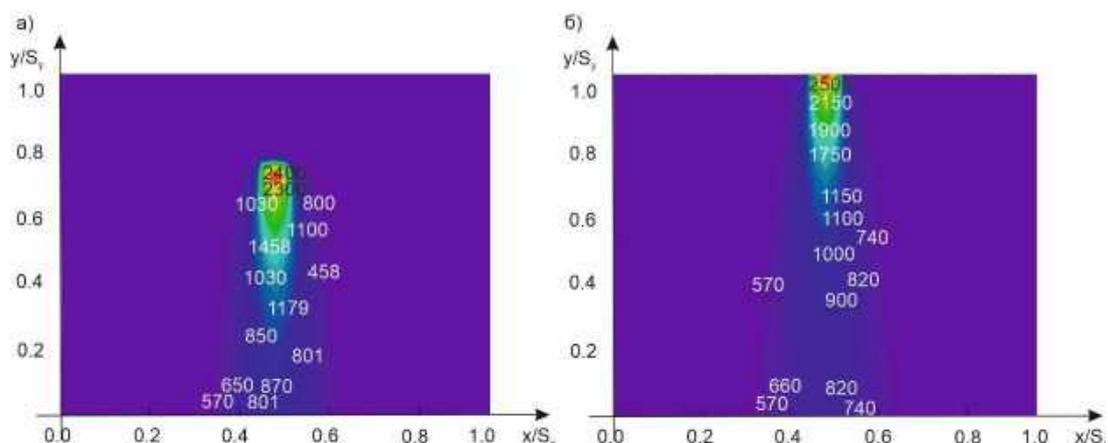


Рис. 4. Распределение температур в материале пластине при предварительном нагреве 500 °С в момент наплава (а) и в момент прекращения наплава (б).

Из рисунков 2-4 видно, что подогрев пластины не увеличивает температуру в центре пятна, а делает распространение температуры гладким, уменьшая температурный градиент, способствующий образованию высоких температурных напряжений.

Остановимся на случае с подогревом пластины до 500 °С. Распределения остаточных напряжений  $\sigma_{xx}$

$\sigma_{yy}$  приведены на рисунках 5-10. Стоит заметить, что касательные напряжения на два порядка меньше приведенных нормальных напряжений и поэтому изображены не были. Основная концентрация сжимающих напряжений расположена вдоль линии нагрева пластины в верхнем слое, а растягивающие на порядок меньше сжимающих расположены в аналогичном месте только в нижнем слое пластины. Это говорит о возможном прогибе пластины.

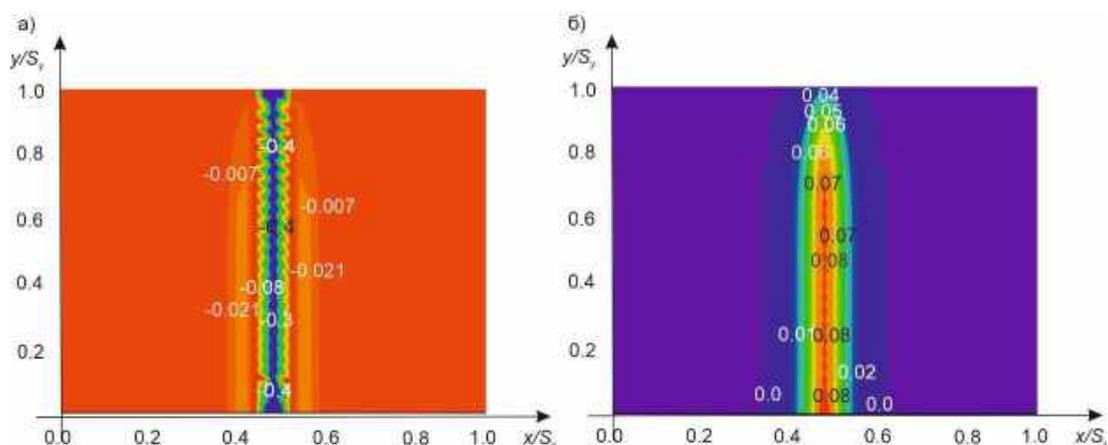


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{xx} / K_0$  в верхнем (а) и нижнем (б) слое пластины, после наплавки. Пластины предварительно подогрели до температуры 500 °С.

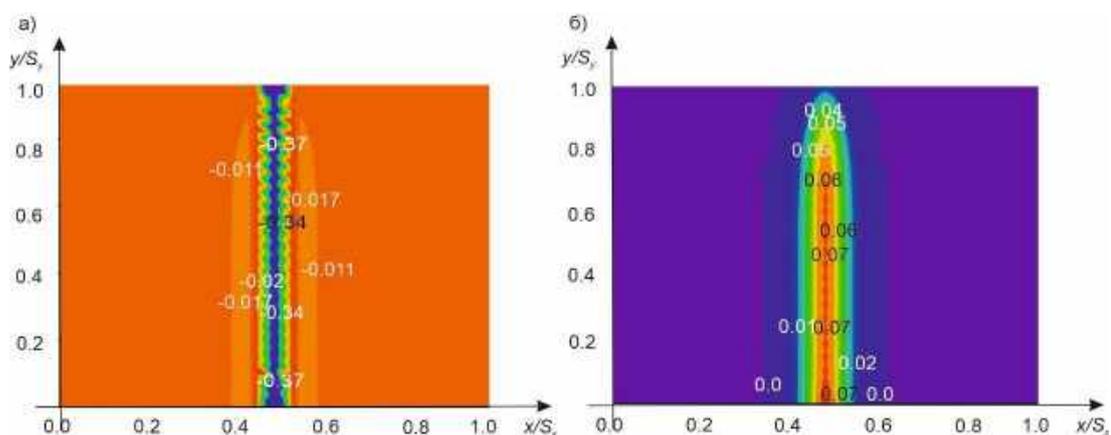


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{yy}/k_0$  в верхнем (а) и нижнем (б) слое пластины, после нанесения наплавки. Пластину предварительно подогрели до температуры 500 °С.

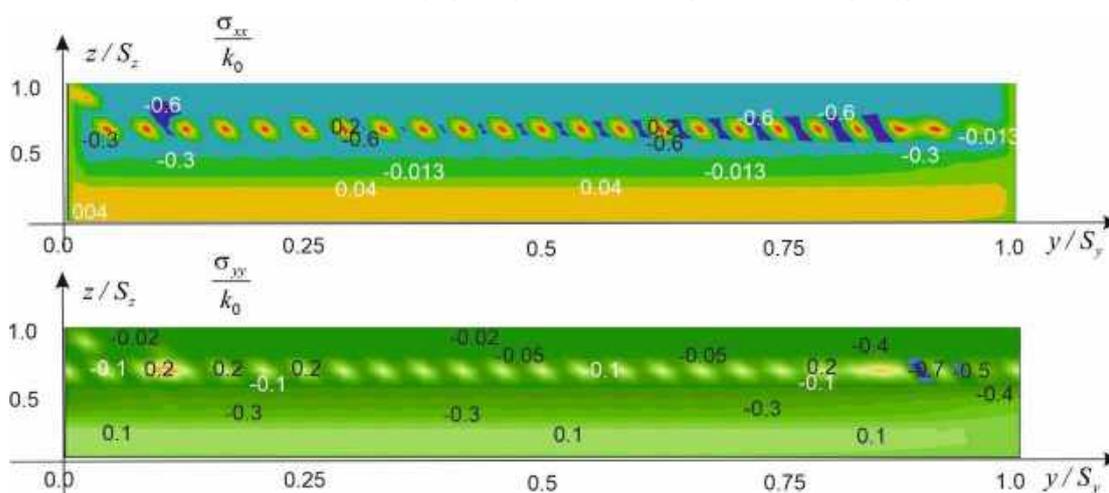


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{xx}/k_0$ ,  $\sigma_{yy}/k_0$  в толщине вдоль линии нагрева пластины с предварительным подогревом 500 °С.

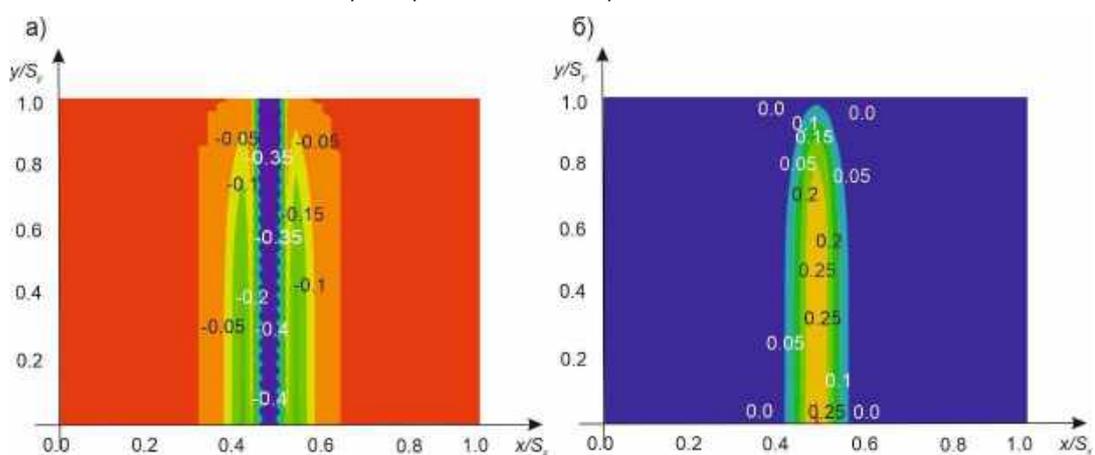


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{xx}/k_0$  в верхнем (а) и нижнем (б) слое пластины, после наплавки. Пластину предварительно подогрели до температуры 200 °С.

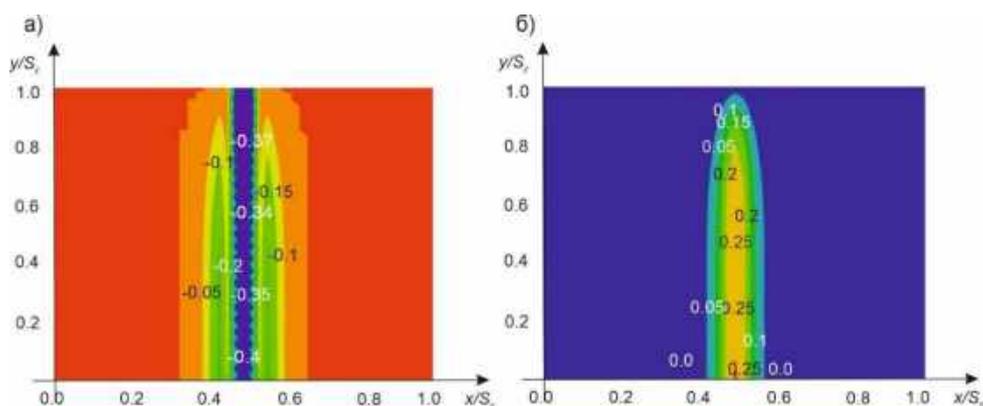


Рис. 9. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{yy}/k_0$  в верхнем (а) и нижнем (б) слое пластины, после нанесения наплавки. Пластину предварительно подогрели до температуры 200 °С.

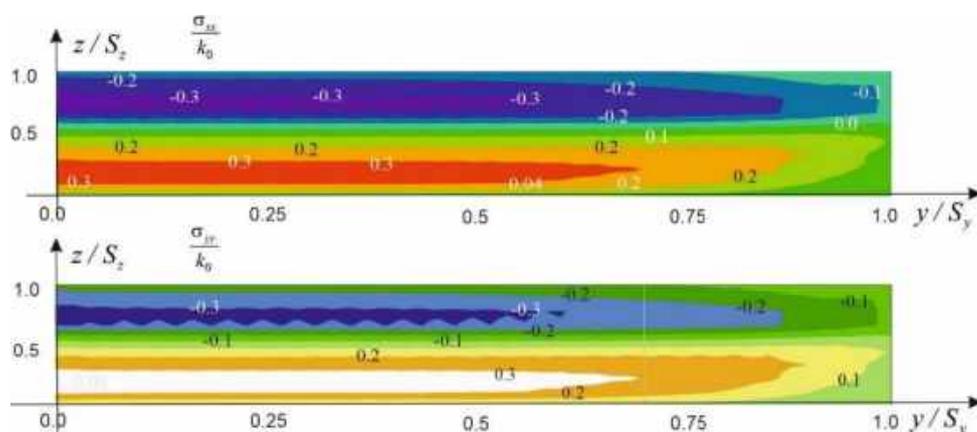


Рис. 10. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{xx}/k_0$ ,  $\sigma_{yy}/k_0$  в толщине вдоль линии нагрева пластины с предварительным подогревом 200 °С.

На рис. 7 представлено распределение остаточных напряжений в толщине пластины. При этом выше в середине пластины расположены «островки» растягивающих напряжений среди сжимающих, размерами чуть превышающими размеры теплового пятна. Картина распределения остаточных напряжений характерна и для других

рассчитанных случаев с тем учетом, что напряжения будут более выражены иметь большее значение. Для сравнения всех случаев на графике рис. 8 в зависимости от температуры подогрева приведены максимальные и минимальные значения остаточных напряжений, образованных в пластине после наплавки.

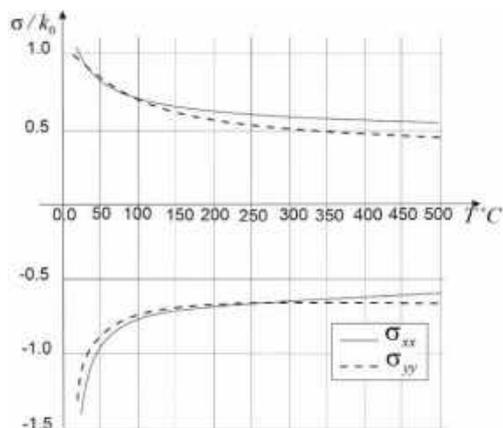


Рис. 8. Зависимость максимальных и минимальных значений остаточных напряжений в зависимости от подогрева пластины

Полученными результатами подтверждается положительное влияние предварительного прогрева на распределения уровня остаточных напряжений в

материале наплавленного слоя при электродуговой наплавке электродной проволокой. При этом, как видно из рисунка 8, достаточно равномерно прогреть

пластину до 200 °С – 250 °С, чтобы снизить значения максимальных напряжений до благоприятного уровня. Что в свою очередь позволит избежать затрат на избыточный предварительный подогрев наплавляемой детали и снизить ее себестоимость с сохранением оптимального прочностного качества наплавляемого слоя.

### Заключение

Описанная математическая модель хорошо согласуется с процессом наплавки и поэтому может быть рекомендована для дальнейших исследований и усовершенствований данного технологического процесса.

### Литература

1. J. Zhang, Z. Huang, Y. Fang, Z. Gu, J. Xie, J. Lei Experiments and numerical simulations for the mechanical properties of Ni-based superalloys fabricated by laser melting deposition. *Optics & Laser Technology* 140 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107058>
2. Roman Nekrasov, Andrei Galinskii, Olga Tempel *Stellite Surfacing Technology Materials Today: Proceedings* 11 pp. 101–106 (2019)
3. Chong Wang, Wojciech Suder, Jialuo Ding, Stewart Williams The effect of wire size on high deposition rate wire and plasma arc additive manufacture of Ti-6Al-4V *Journal of Materials Processing Tech.* (2020) <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec>
4. Соколов Г. НЗорин, И. В., Артемьев А. А., Елсуков С. К., Фастов С. А., Федосюк И. В., Полунин И. А., Моковозов Н.В., Кин А.Э. Наплавка композиционных термо и износостойких сплавов с использованием материалов, содержащих наночастицы тугоплавких химических соединений. *Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении.* - Волгоград, 2019. № 4 (227). С. 61-67.
5. H. Weiss Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment/*Surface and Coatings Technology* 71 pp. 201-207 (1995)
6. N.P. Gokhale and P. Kala, Thermal analysis of TIG-WAAM based metal deposition process using finite element method, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.756>
7. Z. Gan, H.W. Ng, A. Devasenapathi, Deposition-induced residual stresses in plasma-sprayed coatings, *Surf. Coatings Technol.* 187. pp. 307–319. (2004) <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.010>
8. F. Montevecchi, G. Venturini, A. Scippa, G. Campatelli, Finite element modelling of wire-arc-additive-manufacturing process, *Procedia CIRP* 55. pp. 109 – 114 (2016) <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.024>.
9. J. Xiong, Y. Lei, R. Li, Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures, *Appl. Therm. Eng.* 126. pp. 43–52. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.168>
10. S.H. Nikam, N.K. Jain, S. Jhavar, Thermal modeling of geometry of single-track deposition in micro-plasma transferred arc deposition process, *J. Mater. Process. Technol.* 230. pp. 121–130, (2016) <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.022>.
11. M.S. Sawant, N.K. Jain, S.H. Nikam, Theoretical modeling and finite element simulation of dilution in micro-plasma transferred arc additive manufacturing of metallic materials, *Int. J. Mech. Sci.* 164 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105166>.
12. S.H. Nikam, N.K. Jain, Three-dimensional thermal analysis of multi-layer metallic deposition by micro-plasma transferred arc process using finite element simulation, *J. Mater. Process. Technol.* 249 pp. 264–273, (2017), <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.043>.
13. Махненко В.И Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций, Киев: Наукова думка, 1976 г.- 320 с.
14. Azhar Equbala, Md. Israr Equbal, Anoop Kumar Sood *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 26 pp.10–25. (2019) <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.07.001>
15. 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 108071 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108071>
16. 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
17. B. A. Latella, S. R. Humphries Young's modulus of a 2.25 Cr–1Mo steel at elevated temperature *Scripta Materialia* 51. pp. 635–639. (2004) <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.028>
18. Lars-Erik Lindgren, Jessica Gyhlestén Back Elastic properties of ferrite and austenite in low alloy steels versus temperature and alloying *Material* V. 5, (March 2019), 100193 <https://doi.org/10.1016/10.1016/j.mtla.2018.100193>
19. M. RokilanM. Mahendran Elevated temperature mechanical properties of cold-rolled steel sheets and cold-formed steel sections *Journal of Constructional Steel Research* V. 167, (April 2020), 105851 <https://doi.org/10.1016/10.1016/j.jcsr.2019.105851>
20. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В. Большие необратимые деформации и упругое последствие Владивосток. Дальнаука, 2013. 312 с.

### References

1. J. Zhang, Z. Huang, Y. Fang, Z. Gu, J. Xie, J. Lei Experiments and numerical simulations for the mechanical properties of Ni-based superalloys fabricated by laser melting deposition. *Optics & Laser Technology* 140 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107058>

2. Roman Nekrasov, Andrei Galinskii, OlgaTempel Stellite Surfacing Technology Materials Today: Proceedings 11 pp. 101–106 (2019)
3. Chong Wang, Wojciech Suder, Jialuo Ding, Stewart Williams The effect of wire size on high deposition rate wire and plasma arc additive manufacture of Ti-6Al-4V Journal of Materials Processing Tech. (2020) <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec>
4. G. N. Sokolov, I. V. Zorin, A. A. Artemiev, S. K. Elsukov, S. A. Fastov, I. V. Fedosyuk, I. A. Polunin, N. V. Mokovozov, AE Kin Surfacing of composite thermal and wear-resistant alloys using materials containing nanoparticles of refractory chemical compounds. News of VolgGTU. Ser. Problems of materials science, welding and strength in mechanical engineering. - Volgograd, 2019. No. 4 (227). pp. 61-67.
5. H. Weiss Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment/Surface and Coatings Technology 71 pp. 201-207 (1995)
6. N.P. Gokhale and P. Kala, Thermal analysis of TIG-WAAM based metal deposition process using finite element method, Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.756>
7. Z. Gan, H.W. Ng, A. Devasenapathi, Deposition-induced residual stresses in plasma-sprayed coatings, Surf. Coatings Technol. 187. pp. 307–319. (2004) <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.010>
8. F. Montevercchi, G. Venturini, A. Scippa, G. Campatelli, Finite element modelling of wire-arc-additive-manufacturing process, Procedia CIRP 55. pp. 109 – 114 (2016) <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.024>.
9. J. Xiong, Y. Lei, R. Li, Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures, Appl. Therm. Eng. 126. pp. 43–52. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.168>
10. S.H. Nikam, N.K. Jain, S. Jhavar, Thermal modeling of geometry of single-track deposition in micro-plasma transferred arc deposition process, J. Mater. Process. Technol. 230. pp. 121–130, (2016) <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.022>.
11. M.S. Sawant, N.K. Jain, S.H. Nikam, Theoretical modeling and finite element simulation of dilution in micro-plasma transferred arc additive manufacturing of metallic materials, Int. J. Mech. Sci. 164 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105166>.
12. S.H. Nikam, N.K. Jain, Three-dimensional thermal analysis of multi-layer metallic deposition by micro-plasma transferred arc process using finite element simulation, J. Mater. Process. Technol. 249 pp. 264–273, (2017), <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.043>.
13. Makhnenko V.I. Calculation methods for studying the kinetics of welding stresses and strains, Kyiv: Naukova Dumka, 1976 - 320 p.
14. Azhar Equbal, Md. Israr Equbal, Anoop Kumar Sood CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 26 pp.10–25. (2019) <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.07.001>
15. 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 108071 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108071>
16. 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
17. B. A. Latella, S. R. Humphries Young's modulus of a 2.25 Cr–1Mo steel at elevated temperature Scripta Materialia 51. pp. 635–639. (2004) <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.028>
18. Lars-Erik Lindgren, Jessica Gyhlestén Back Elastic properties of ferrite and austenite in low alloy steels versus temperature and alloying Material V. 5, (March 2019), 100193 <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.100193>
19. M. RokilanM. Mahendran Elevated temperature mechanical properties of cold-rolled steelsheets and cold-formed steel sections Journal of Constructional Steel Research V. 167, (April 2020), 105851 <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105851>
20. A.A. Burenin, L.V. Kovtanyuk Large irreversible deformations and elastic aftereffect Vladivostok. Dalnauka, 2013. 312 p.

#### **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/the article was submitted 21.04.2022.  
 Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.07.2022.  
 Принята к публикации/accepted for publication 25.07.2022.

## Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.041>**Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна в условиях мелководья**В.Ю. Семенова<sup>1</sup> [sem\\_viktoria@mail.ru](mailto:sem_viktoria@mail.ru), Д.А. Альбаев<sup>1</sup> [albaevdanil@gmail.com](mailto:albaevdanil@gmail.com)<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

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

**Ключевые слова:** метод интегральных уравнений, трехмерная потенциальная теория, потенциал второго порядка, функция Грина, нелинейные силы, взаимодействие колебаний, мелководье

**Для цитирования:** Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна в условиях мелководья, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 319—327.

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.041>**Numerical determination of non-linear forces of the second order arising from the interaction of certain types of ship's motion in shallow water conditions**Viktoriya Yu. Semenova<sup>1</sup> [sem\\_viktoria@mail.ru](mailto:sem_viktoria@mail.ru), Danil A. Al'baev<sup>1</sup> [albaevdanil@gmail.com](mailto:albaevdanil@gmail.com)<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

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

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

**For citation:** Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev, Numerical determination of non-linear forces of the second order arising from the interaction of certain types of ship's motion in shallow water conditions, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 319—327.

**Введение**

В соответствии с применением метода малого параметра [1], [6] суммарные нелинейные силы, действующие на судно в условиях мелководья на регулярном волнении, будут содержать составляющие, обусловленные взаимодействием отдельных шести видов качки между собой: вертикальной и бортовой, бортовой и поперечно-

горизонтальной, вертикальной и килевой, бортовой и килевой и т.д.

Определение некоторых из данных сил было рассмотрено авторами в работе [5], но для случая бесконечно-глубокой жидкости. В работах авторов [2], [3], [4], посвященных решению нелинейных задач на мелководье, было рассмотрено определение нелинейных сил и моментов, обусловленных отдельными видами поперечной качки: поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой [2],

взаимодействием дифрагированного и набегающего волнения между собой [3], взаимодействием волнения и отдельных видов колебаний [4]

В работе Со Чжо Ту [6] было проведено определение нелинейных сил, возникающих при взаимодействии вертикальных, поперечно-горизонтальных и бортовых колебаний шпангоутных контуров на основании гипотезы плоских сечений. Приведены результаты изменения данных сил в зависимости от относительной глубины для различных типов шпангоутных контуров. При использовании двумерной теории имеет место трудоемкое определение интегралов, связанных с граничным условием на свободной поверхности. Именно в условиях жидкости ограниченной глубины подынтегральные функции представляют собой осциллирующие незатухающие функции и вычисление интегралов связано с применением специальной процедуры.

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

Результаты работы [6] показали, что составляющие нелинейных сил, обусловленные взаимодействием различных поперечных видов колебаний, оказывают значительное влияние на суммарные нелинейные силы в зонах основных резонансов вертикальной и бортовой качки и их вычислением пренебрегать нельзя.

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

**Описание метода**

Для решения задачи вводится следующая система координат

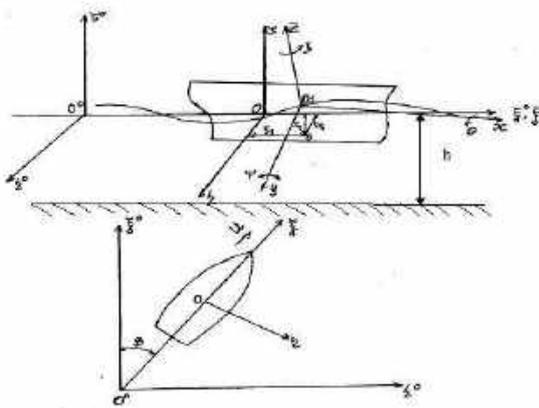


Рис.1 Система координат

Судно совершает шесть видов колебаний: 1-продольно-горизонтальные, 2-поперечно-горизонтальные, 3- вертикальные, 4-бортовые, 5-килевые, 6-рысканье

На основании метода малого параметра [1], [6], граничное условие на смоченной поверхности второго порядка потенциала при взаимодействии отдельных видов колебаний из этих шести имеет вид:

$$\frac{d\Phi_{km}^{(2)}}{dn} = -\frac{i}{2}n(\bar{X}^{(1)} \cdot \nabla)\nabla\Phi_k^{(1)} - \frac{i}{2}n(\bar{X}^{(1)} \cdot \nabla)\nabla\Phi_m^{(1)} + \frac{i}{2}(V^{(1)} - \nabla\Phi_k^{(1)})N^{(1)} + \frac{i}{2}(V^{(1)} - \nabla\Phi_m^{(1)})N^{(1)} \quad (1)$$

$k = 1, 2, 3, 4, 5, 6; m = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$

где

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

$$N^{(1)} = \begin{Bmatrix} \psi^{(1)} \cos(n, z) - \chi^{(1)} \cos(n, y) \\ -\theta^{(1)} \cos(n, z) + \chi^{(1)} \cos(n, x) \\ \theta^{(1)} \cos(n, y) - \psi^{(1)} \cos(n, x) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$V^{(1)} = \begin{Bmatrix} \xi_g^{(1)} + (\psi^{(1)}z - \chi^{(1)}y) \\ \eta_g^{(1)} - (\theta^{(1)}z - \chi^{(1)}x) \\ \zeta_g^{(1)} + (\theta^{(1)}y - \psi^{(1)}x) \end{Bmatrix};$$

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

Объединенное граничное условие второго порядка на свободной поверхности можно представить как:

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

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

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

Полученное уравнение (4) является интегральным уравнением Фредгольма второго рода. Для численного решения смоченная и свободная поверхность разбивается на конечное число плоских панелей (рис. 2). Такой подход трансформирует исходное интегральное уравнение в систему линейных алгебраических уравнений для неизвестных потенциалов.

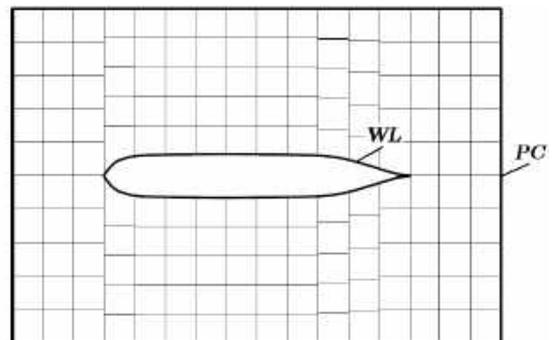


Рис. 2. Разбиение свободной поверхности на панели

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

$$G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \int_0^\infty \frac{2(k+4v)e^{-kh} \cosh k(z+h)}{k \sinh kh - 4v \cosh kh} \cdot \cosh k(\zeta+h) J_0(kR) dk + 2((4\mu_0)^2 - (4v)^2) \cosh 4\mu_0(z+h) \cdot \cosh 4\mu_0(\zeta+h) J_0(\mu_0 R). \quad (5)$$

Здесь  $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$ ;  $r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2}$ ;  $R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$ ;  $v = \frac{\omega^2}{g}$  – волновое число;  $\mu_0$  – положительный корень трансцендентного уравнения, имеющего вид:  $\mu_0 \tanh(\mu_0 H) = v$ ;  $J_0$  – функция Бесселя.

В выражениях (4) и **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) интеграл  $\iint_{S_F}$  берется по свободной поверхности. При численной реализации свободная поверхность разбивается на прямоугольные панели (рис. 1), при этом сходимость интеграла обеспечивается достаточной протяжённостью вправо и влево от судна благодаря тому, что пределы интегралов по свободной поверхности на бесконечности равны  $1/(R\sqrt{R})$ .

Также как и в работе [5], остановимся на подробном рассмотрении взаимодействия следующих видов качки: поперечно-горизонтальной и бортовой ( $k=2, m=4$ ); вертикальной и бортовой ( $k=3, m=4$ ); поперечно-горизонтальной и вертикальной ( $k=2, m=3$ ). Тогда граничные условия (1) с учетом (2) преобразуются в:

-поперечно-горизонтальная и бортовая качка:

$$\frac{d\Phi_{24}^{(2)}}{dn} = -\frac{i}{2}\eta_g \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) + \frac{i}{2}\theta_z \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) - \frac{i}{2}\theta_y \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) - \frac{i}{2}\eta_g \theta \cos(n, z) - \frac{i}{2}\theta \left( \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \cos(n, y) - \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \cos(n, z) \right); \quad (6)$$

-вертикальная и бортовая качка:

$$\frac{d\Phi_{34}^{(2)}}{dn} = -\frac{i}{2}\zeta_g \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) + \frac{i}{2}\theta_z \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) \right) \quad (7)$$

$$+ \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \Big) - \frac{i}{2}\theta_y \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) - \frac{i}{2}\zeta_g \theta \cos(n, y) - \frac{i}{2}\theta \left( \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial z} \cos(n, y) - \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \cos(n, z) \right);$$

-поперечно-горизонтальная и вертикальная качка:

$$\frac{d\Phi_{23}^{(2)}}{dn} = -\frac{i}{2}\zeta_g \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) - \frac{i}{2}\eta_g \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right). \quad (8)$$

Основные трудности решения задачи возникают при определении вторых производных, входящих в граничные условия на смоченной и свободной поверхности. Благодаря использованию векторных преобразований, теоремы Стокса и теоремы Гаусса [9], [10] вычисления данных производных можно избежать вообще и получить следующие выражения, входящие в правые части уравнения (4).

Тогда для следующих видов качки будем иметь:

- поперечно-горизонтальная и бортовая качка:

$$-\frac{i}{2} \iint_{\Omega} \frac{d\Phi_{24}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \eta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, y) - \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial n} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} d\Omega + \eta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[ \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} s_z - \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} s_x \right] G^{(2)} dl + \theta \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] (y \cos(n, z) - z \cos(n, y)) - \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial n} \left( \frac{\partial G^{(2)}}{\partial z} y - \frac{\partial G^{(2)}}{\partial y} z \right) d\Omega + \theta y \iint_{WL} \left[ \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} s_x - \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} s_y \right] G^{(2)} dl \quad (9)$$

-вертикальная и бортовая качка:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{i}{2} \iint_{\Omega} \frac{d\Phi_{34}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \\
 & = \zeta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, z) - \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial n} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} d\Omega + \\
 & + \zeta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[ \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} s_x - \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} s_y \right] G^{(2)} dl + \\
 & + \theta \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] (y \cos(n, z) - z \cos(n, y)) - \\
 & - \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial n} \left( \frac{\partial G^{(2)}}{\partial z} y - \frac{\partial G^{(2)}}{\partial y} z \right) d\Omega + \\
 & + \theta y \iint_{WL} \left[ \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} s_x - \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} s_y \right] G^{(2)} dl
 \end{aligned} \tag{10}$$

-поперечно-горизонтальная и вертикальная качка:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{i}{2} \iint_{\Omega} \frac{d\Phi_{23}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \\
 & = \zeta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, z) - \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial n} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} d\Omega + \\
 & + \zeta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[ \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} s_x - \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} s_y \right] G^{(2)} dl + \\
 & + \eta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, y) - \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial n} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} d\Omega + \\
 & + \eta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[ \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} s_z - \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial z} s_x \right] G^{(2)} dl
 \end{aligned} \tag{11}$$

Здесь  $s_x = n_y / \sqrt{1 - n_z^2}$ ,  $s_y = -n_x / \sqrt{1 - n_z^2}$ ,  $s_z = 0$ .

Таблица основных характеристик судов

Тип/ Название судна	L	B	T	δ	α	h <sub>0</sub>
Лихтеровоз "Алексей Косыгин"	232	32	10.6	0.57	0.82	3.99
Балкер "Капитан Панфилов"	134	20.6	9.4	0.78	0.88	1.45
Лесовоз "Николай Новиков"	140	21	8.68	0.74	0.83	2.31
Сухогруз "Новгород"	138	20.6	9	0.68	0.79	1.0
Танкер	310	47.2	18.9	0.85	0.9	7.442

На рисунках 3-5 приведены изменения действительных и мнимых частей граничных условий на свободной поверхности  $QF_{23}$ ,  $QF_{24}$ ,  $QF_{34}$  в зависимости от изменения относительной глубины Н/Т, рассчитанные для различных типов судов и разных значений частот. Из приведенных

Обход вторых производных на свободной поверхности осуществляется по общей формуле [9]

$$\begin{aligned}
 & \iint_{S_F} \Phi_k^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_k^{(1)}}{\partial z^2} G^{(2)} dS_F = \\
 & = - \iint_{WL+PC} \Phi_k^{(1)} (\nabla \Phi_k^{(1)} \cdot n) G^{(2)} dl + \\
 & + \iint_{S_F} (\nabla \Phi_k^{(1)} \nabla \Phi_k^{(1)}) G^{(2)} dS_F + \\
 & + \iint_{S_F} \Phi_k^{(1)} (\nabla \Phi_k^{(1)} \nabla G^{(2)}) dS_F, \\
 & k = 2, 3, 4.
 \end{aligned} \tag{12}$$

В выражении (12)  $\iint_{WL+PC}$  берется по контуру ватерлинии судна и по контуру, ограничивающему свободную поверхность жидкости на достаточно большом удалении от судна.

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

$$\begin{aligned}
 p_{km}^{(2)} = & -\rho \frac{\partial \Phi_{km}^{(2)}}{\partial t} - \\
 & -\rho \left[ \left( \frac{\partial \Phi_k^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_m^{(1)}}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial \Phi_k^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_m^{(1)}}{\partial y} \right) + \right. \\
 & \left. + \left( \frac{\partial \Phi_k^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial \Phi_m^{(1)}}{\partial z} \right) \right], \\
 & k = 2, 3, 4; m = 2, 3, 4.
 \end{aligned} \tag{13}$$

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

### Анализ результатов

На основании изложенного была разработана программа, реализующая определение нелинейных сил и моментов, обусловленных взаимодействием отдельных видов колебаний судна с использованием функции Грина ограниченной глубины (5) при различных Н/Т.

Расчеты нелинейных сил и моментов, проводились для пяти различных типов судов при курсовом угле  $\beta = 90$ . Все нелинейные силы отнесены к квадрату амплитуды волны, так как входящие в них амплитуды качки первого порядка от нее зависят. В таблице 1 приведены основные характеристики данных судов.

Таблица 1

входящие в (4) обладают достаточно быстрой сходимостью.

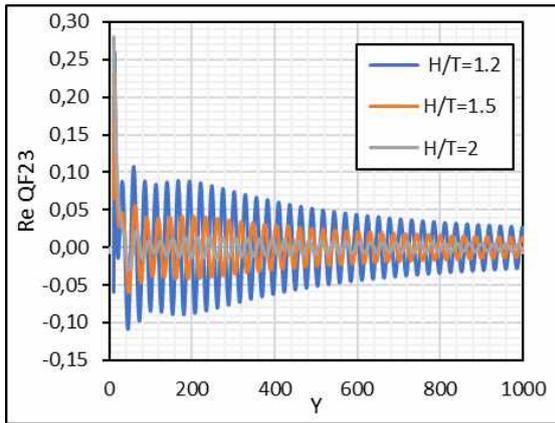


Рис.3. Реальная часть  $Q_{F23}$  на свободной поверхности для балкера «Капитан Панфилов» при различных  $\frac{H}{T}$  и  $\omega=1$  1/с

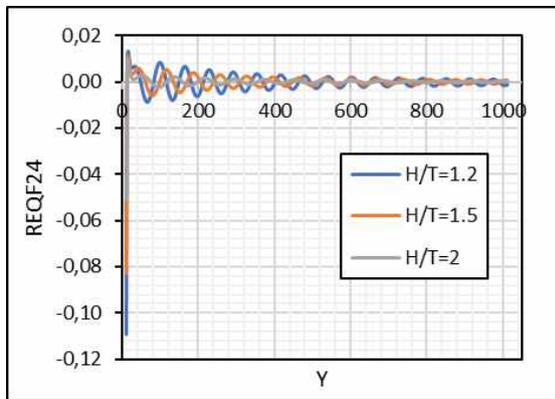


Рис.4. Реальная часть  $Q_{F24}$  на свободной поверхности для сухогруза «Новгород» при различных  $\frac{H}{T}$  и  $\omega=0.5$  1/с

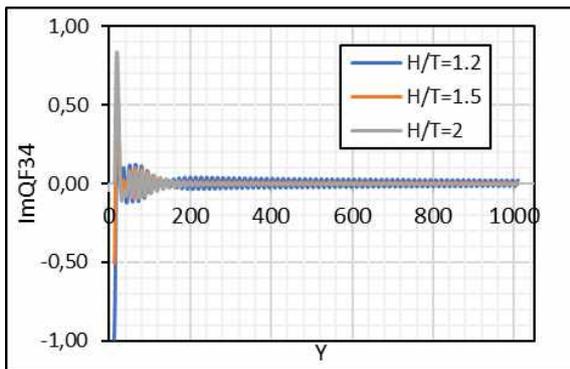


Рис.5. Мнимая часть  $Q_{F34}$  на свободной поверхности для лесовоза «Николай Новиков» при различных  $\frac{H}{T}$  и  $\omega=1.5$  1/с

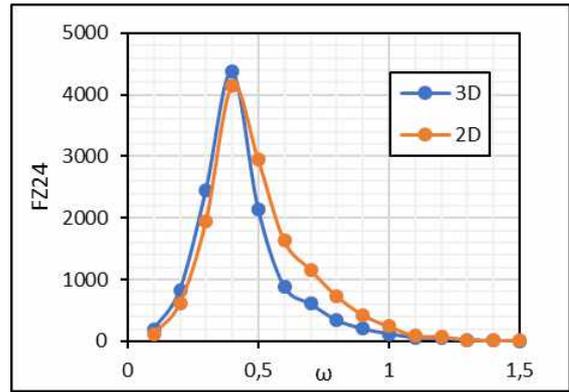


Рис. 6 Сравнение  $F_{Z24}^{(2)}$  для танкера по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 1.2$ )

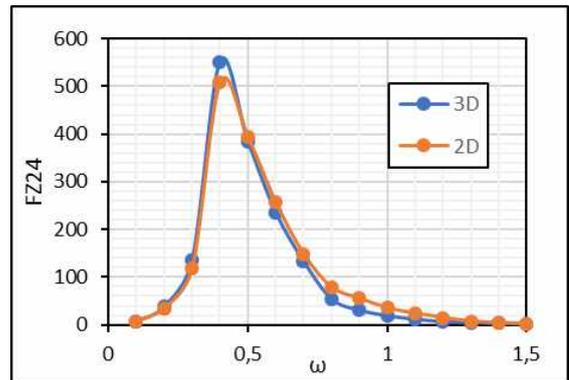


Рис. 7. Сравнение  $F_{Z24}^{(2)}$  для сухогруза «Новгород» по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 2$ )

Для валидации разработанной программы далее приводятся сравнения различных составляющих нелинейных сил, полученных по разработанной программе с расчетами по двумерной теории [6]. На рис. 6-15 представлены сравнения нелинейных сил и моментов  $F_{Z24}^{(2)}$ ,  $F_{Y23}^{(2)}$ ,  $M_{X23}^{(2)}$ ,  $F_{Y34}^{(2)}$ ,  $M_{X34}^{(2)}$  возникающих при взаимодействии поперечно-горизонтальных и бортовых колебаний, поперечно-горизонтальных и вертикальных, вертикальных и бортовых для различных типов судов и различных относительных глубин.

Сопоставление показывает отличное согласование нелинейных вертикальных сил  $F_{Z24}^{(2)}$ , горизонтальной силы  $F_{Y34}^{(2)}$  и момента  $M_{X34}^{(2)}$  для всех судов, а также момента  $M_{X23}^{(2)}$ . Несколько хуже совпадают результаты, полученные по двумерной и трехмерной теории для нелинейной горизонтальной силы  $F_{Y23}^{(2)}$  (рис.7,8). В области частот  $\omega < 0.5$  расчеты по двумерной теории дают либо заниженные значения, либо завышенные по сравнению с трехмерной теорией. При  $\omega > 0.5$  результаты неплохо согласуются между собой.

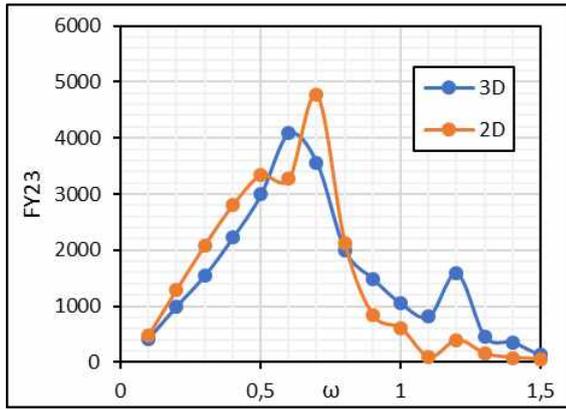


Рис. 8. Сравнение  $F_{Y23}^{(2)}$  для лихтеровоза «Алексей Косыгин» по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 1.2$ )

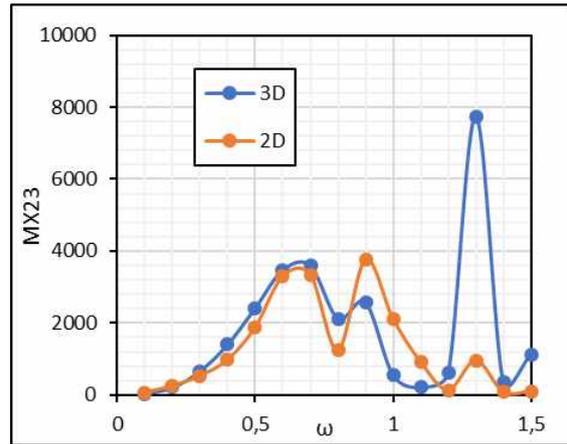


Рис. 11. Сравнение  $M_{X23}^{(2)}$  для балкера «Капитан Панфилов» по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 2$ )

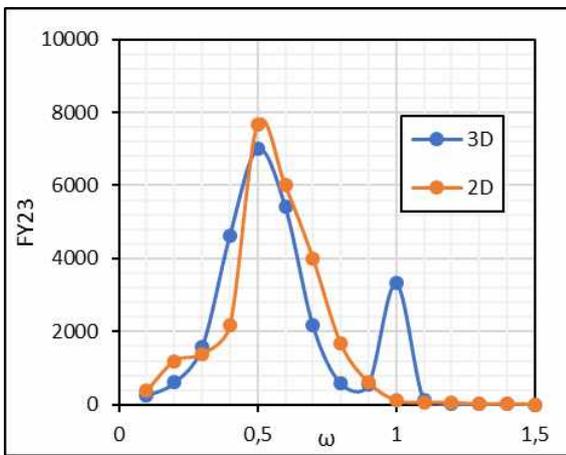


Рис. 9. Сравнение  $F_{Y23}^{(2)}$  для танкера по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 2$ )

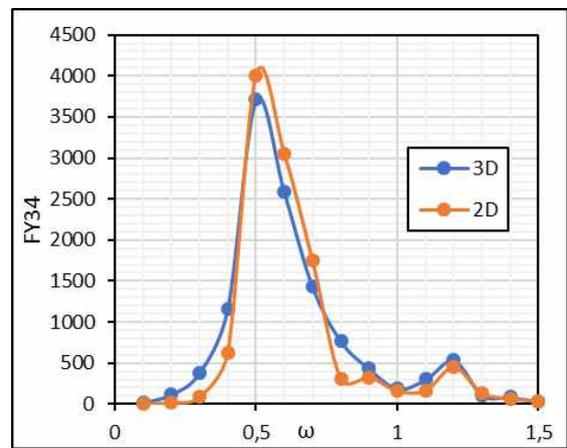


Рис. 12. Сравнение  $F_{Y34}^{(2)}$  для лихтеровоза «Алексей Косыгин» по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 1.2$ )

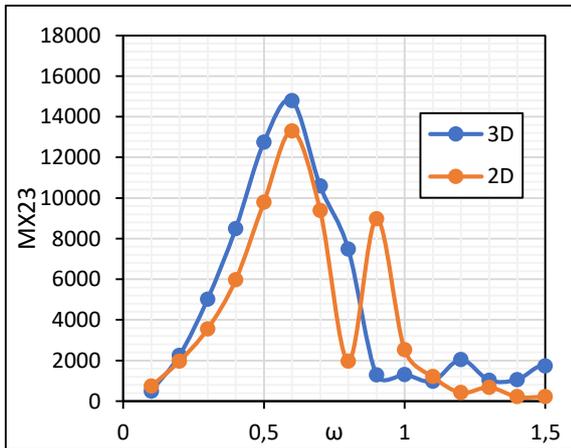


Рис. 10. Сравнение  $M_{X23}^{(2)}$  для лесовоза «Николай Новиков» по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 1.2$ )

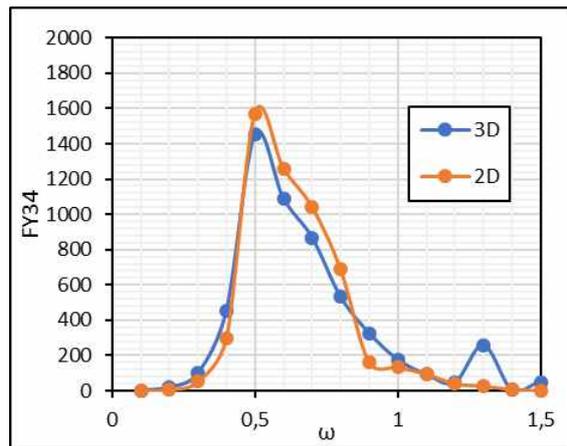


Рис. 13. Сравнение  $F_{Y34}^{(2)}$  для балкера «Капитан Панфилов» по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 1.5$ )

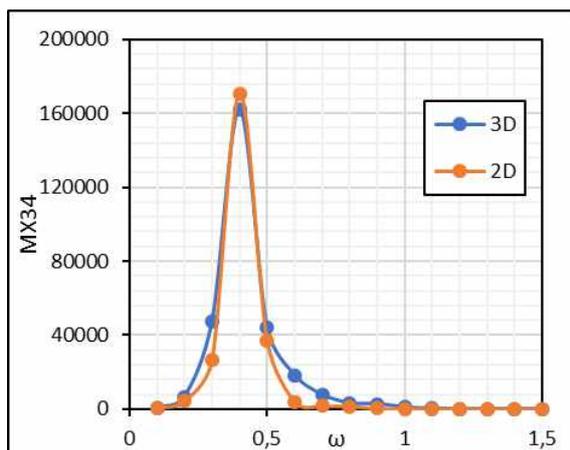


Рис. 14. Сравнение  $M_{x34}^{(2)}$  для танкера по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 1.2$ )

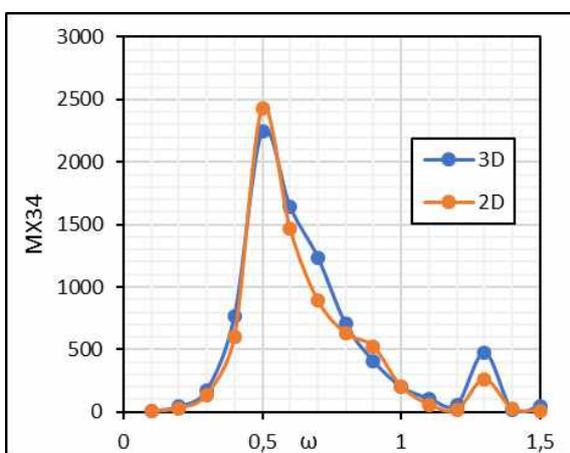


Рис. 15. Сравнение  $M_{x34}^{(2)}$  для балкера «Капитан Панфилов» по двумерной и трехмерной теории ( $H/T = 1.2$ )

На рис.16 представлены результаты расчетов нелинейной вертикальной силы, возникающей при взаимодействии поперечно-горизонтальной и бортовой качки в зависимости от изменения отношения относительной глубины. Из представленных результатов видно, что максимальные значения данных сил уменьшаются при увеличении  $H/T$ . Так, значение  $F_{z24}^{(2)}$  при  $H/T=1.2$  в 1,8 раз больше, чем при  $H/T=10$  для балкера «Капитан Панфилов». Положение максимального значения нелинейной вертикальной силы совпадает с положением по оси частот основного резонанса бортовой качки и с изменением относительной глубины практически не меняет своего положения.

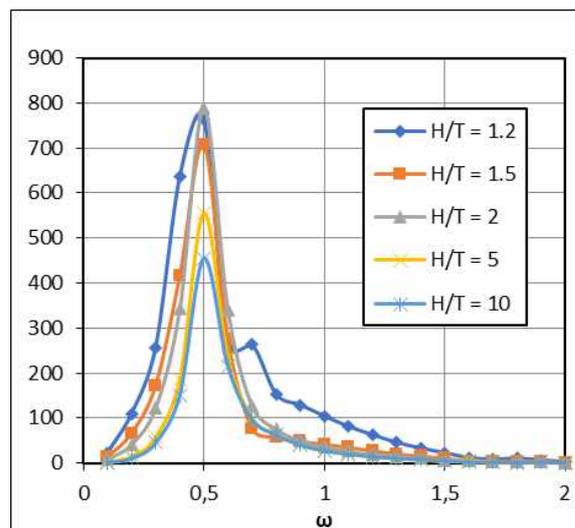


Рис. 16.  $F_{z24}^{(2)}$  для балкера «Капитан Панфилов» при различных  $H/T$

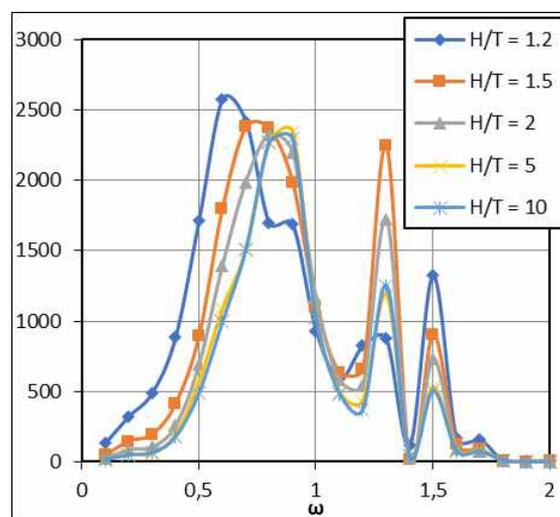


Рис. 17.  $F_{y23}^{(2)}$  для лесовоза «Николай Новиков» при различных  $H/T$

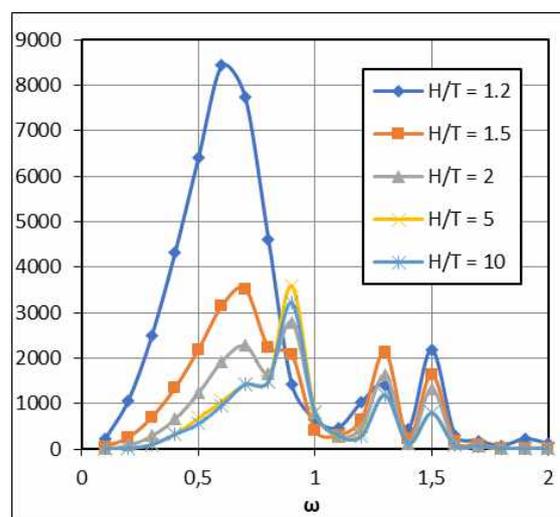


Рис. 18.  $M_{x23}^{(2)}$  для сухогруза «Новгород» при различных  $H/T$

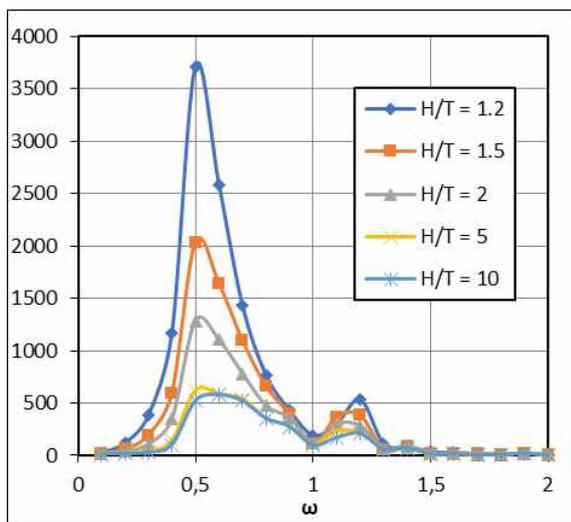


Рис. 19.  $F_{Y34}^{(2)}$  для лихтеровоза «Алексей Косыгин» при различных  $H/T$

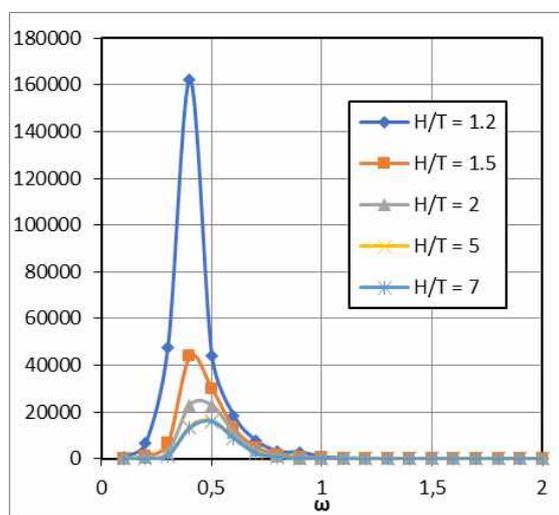


Рис. 20.  $M_{X34}^{(2)}$  для танкера при различных  $H/T$

На рис. 17, 18 представлены нелинейные горизонтальные силы  $F_{Y23}^{(2)}$  и моменты  $M_{X23}^{(2)}$ , возникающие при взаимодействии поперечно-горизонтальной и вертикальной качки. Для данных реакций также наблюдается увеличение максимальных значений при уменьшении относительной глубины  $H/T$  и характерен их сдвиг в область низких частот. Сдвиг обусловлен сдвигом амплитудно-частотных характеристик вертикальной качки в том же направлении. Для моментов  $M_{X23}^{(2)}$  характерно многократное увеличение значений при  $H/T=1.2$ . Так, значение момента при  $H/T=1.2$  в 2.42 раз больше, чем при  $H/T=1.5$  и в 5.7 раз больше, чем при  $H/T=10$  (рис.18). Следует отметить, что как

нелинейные горизонтальные силы, так и моменты при увеличении  $H/T$  выше 5 не изменяются.

На рис.19,20 представлены нелинейные реакции, возникающие при взаимодействии вертикальной и бортовой качки – нелинейные горизонтальные силы  $F_{Y34}^{(2)}$  и моменты  $M_{X34}^{(2)}$ . Для них характерно значительное увеличение максимальных значений при  $H/T=1.2$  по сравнению с  $H/T=1.5$ . Так, горизонтальная сила для лихтеровоза увеличивается в 1.875 раз (рис.18), а момент, действующий на танкер -в 4 раза (рис.20). Для данных нелинейных реакций наблюдается сдвиг значений в область низких частот, обусловленный влиянием вертикальной качки.

Все рассмотренные нелинейные силы и моменты имеют максимальные значения в зоне частот  $\omega < 1$ , зоне соответствующей положениям резонансов вертикальной и бортовой качки. В зоне частот  $\omega > 1$  значения всех нелинейных сил неуклонно стремятся к нулевым значениям и влияние изменения относительной глубины практически не проявляется.

### Заключение

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

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при оценке суммарных нелинейных сил, действующих на судно в условиях регулярного волнения в жидкости ограниченной глубины и составлении соответствующих дифференциальных уравнений для определения амплитуд качки второго порядка.

Суммарные нелинейные силы будут состоять из суперпозиции всех составляющих, последовательно найденных в цикле работ авторов. Данные силы вызывают амплитуды качки второго порядка, т.е. супергармонические резонансы, имеющие место в области частот, в два раза меньших собственной. Каждая отдельная составляющая нелинейной силы, выделенная в соответствии с методом малого параметра, вносит свою непосредственную роль. Без учета какой-либо составляющей определение суммарных сил не представляется корректным.

### Литература

1. Семенова В. Ю. (2005) Разработка метода расчета нелинейной качки судов //Дисс. на соиск. уч. степени д. т. н. Библиотека СПбГМТУ.
2. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2020) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечной качке судна на мелководье. Морские интеллектуальные технологии, N4, т3. С.18-28
3. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А (2021) Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно в условиях мелководья на основании использования трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии, N3, т1. С.25-34

4. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2022) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна в условиях мелководья. Морские интеллектуальные технологии. № 2, часть.2. С. 37-46.
5. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2022) Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна на регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии. № 2, часть.2. С. 125-133
6. Со Чжо Ту (2014) Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье: дис. – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
7. John F. On the Motion of Floating Bodies // Comm. Pure and Applied Mathematics. – 1950. – vol. 3. – pp. 45-1014.
8. Kim M.H. (1991) Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. //Applied Ocean Research, Vol.13, No.6. pp.287-296
9. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusetts institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
10. Lee C. H., Zhu X. (1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
11. Papanikolaou A., Nowacki H. (1980) Second-order theory of oscillating cylinders in a regular steep wave. Proc.of the 13<sup>th</sup> Symp.on Naval Hydrodynamics, Tokyo, pp.303-331
12. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N (1993), Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, N 6, c.165-185.

#### References

1. Semenova V. Ju. (2005) Razrabotka metoda rascheta nelinejnoj kachki sudov [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships] //Diss. na soisk. uch. stepeni d. t. n. Biblioteka SPbGMTU.
2. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2020) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri poperechnoy kachke sudna na melkovod'e. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N4, t3. S.18-28
3. Semenova V.Yu., Al'baev D.A (2021) Opredelenie nelineynykh difraktsionnykh sil vtorogo poryadka, deystvuyushchikh na sudno v usloviyakh melkovod'ya na osnovanii ispol'zovaniya trekhmernoy potentsial'noy teorii. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N3, t1. S.25-34
4. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2022) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri vzaimodeystvii volneniya i otdel'nykh vidov kachki sudna v usloviyakh melkovod'ya. Morskie intellektual'nye tekhnologii. № 2, chast'.2. S. 37-46.
5. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2022) Chislennoe opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri vzaimodeystvii otdel'nykh vidov kachki sudna na regul'yarnom volnenii. Morskie intellektual'nye tekhnologii. № 2, chast'.2. S. 125-133
6. So Chzho Tu (2014) Razrabotka metoda rascheta nelinejnykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchih pri kachke sudna na melkovod'e [Development of a method for calculating nonlinear second-order forces arising during the motions of a ship in shallow water]: dis. – Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj morskoy tekhnicheskij universitet
7. John F. On the Motion of Floating Bodies // Comm. Pure and Applied Mathematics. – 1950. – vol. 3. – pp. 45-1014.
8. Kim M.H. (1991) Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. //Applied Ocean Research, Vol.13, No.6. pp.287-296
9. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusetts institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
10. Lee C. H., Zhu X. (1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
11. Papanikolaou A., Nowacki H. (1980) Second-order theory of oscillating cylinders in a regular steep wave. Proc.of the 13<sup>th</sup> Symp.on Naval Hydrodynamics, Tokyo, pp.303-331.
12. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N (1993), Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, N 6, c.165-185.

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 27.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 30.07.2022.

Научная статья

УДК 621.3.078

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.042>

## Управляемый задатчик интенсивности в системах автоматического управления

В.К. Усольцев<sup>1</sup> usvalerij@yandex.ru, К.В. Чупина<sup>1</sup> chupina.kv@dvfu.ru<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы синтеза управляемого задатчика интенсивности для систем автоматического управления электроприводами. Неуправляемые задатчики интенсивности затягивают переходные процессы, снижая быстродействие электропривода. Показано, что максимально использовать возможности астатических регуляторов в системе управления, не допуская их вход в зону насыщения, возможно, если задатчик интенсивности будет изменять темп задающего сигнала в переходных процессах. Предложена структура системы управления, позволяющая учитывать скорость изменения управляющего сигнала на выходе регулятора. Разработана методика, позволяющая выполнить синтез регулятора, управляющего задатчиком. Применение управляемого задатчика интенсивности увеличивает быстродействие системы управления, уменьшает перерегулирование, исключает «интегральное насыщение» для ПИ и для ПИД регуляторов. Исследование показало, что использование управляемого задатчика не влияет на поведение системы управления при внешних возмущающих воздействиях. Цифровое моделирование показало работоспособность и эффективность управляемого задатчика при различных законах управления.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, управляемый задатчик интенсивности, интегральное насыщение, передаточная функция, регулятор, переходный процесс, устойчивость, цифровое моделирование  
**Для цитирования:** Усольцев В.К., Чупина К.В. Управляемый задатчик интенсивности в системах автоматического управления, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 328—332.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.042>

## The controlled ramp-function generator for control systems

Valery K. Usoltsev<sup>1</sup> usvalerij@yandex.ru, Kira V. Chupina<sup>1</sup> chupina.kv@dvfu.ru<sup>1</sup>Far Eastern Federal University, Russian Federation

**Abstract.** The article is devoted to problem of synthesis of ramp-function generator for electric drive control systems. Because of the uncontrolled ramp-function generators slow transients take place in control systems. It's well-known that the astatic controllers will be used better if they won't operate in the integral windup. It is possible if the ramp-function generator will change a rate of specified signal during transients. The offered mathematic model takes into account the rate of the controller output. The technique for synthesis of the controller for ramp-function generator is developed. Due to using of a controlled ramp-function generator fast transients with minimum overshoot will take place in control systems and integral windup for PI and PID controllers is eliminated. Controlled ramp-function generator doesn't affect the states of control system caused external disturbances. Digital simulations showed the effectiveness of a controlled ramp-function generator for different control algorithms.

**Keywords:** control system, controlled ramp-function generator, integral windup, transfer function, controller, transient, stability, digital simulations

**For citation:** Valery K. Usoltsev, Kira V. Chupina, The controlled ramp-function generator for control systems, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 328—332.

### Введение

Современные электроприводы должны обеспечивать высокое быстродействие при отработке управляющих и возмущающих воздействий, что обусловлено требованиями повышения производительности. Однако необходимость демпфирования упругих колебаний в электромеханической системе для повышения надежности и долговечности работы механизмов требует плавного изменения регулируемых координат в динамических режимах, т.е. решения задачи обеспечения движения по оптимальным траекториям [1-4].

Задатчики интенсивности применяются в системах автоматического управления (САУ) электроприводами для ограничения темпа

изменения управляющего сигнала. Ограничение темпа изменения управляющего сигнала необходимо либо для ограничения скорости изменения выхода объекта управления, либо для исключения захода регуляторов, имеющих в своей структуре интеграторы, в зону насыщения. Выход регулятора из зоны «интегрального насыщения» сопровождается возникновением в нем свободных движений и ведет к ухудшению переходных процессов [5-7].

Неуправляемые задатчики интенсивности, обеспечивающие постоянный темп изменения своего выхода, рассчитываются на работу регуляторов в переходных процессах на границе линейной области. Однако они затягивают переходные процессы, снижая быстродействие САУ [8-9]. Сформировать максимальный управляющий сигнал, не допуская

вход регулятора в зону насыщения, возможно, если задатчик интенсивности сделать управляемым с переменным темпом изменения его выхода в переходных процессах

**1. Анализ неуправляемого задатчика интенсивности**

Структура неуправляемого задатчика интенсивности приведена на рис. 1.

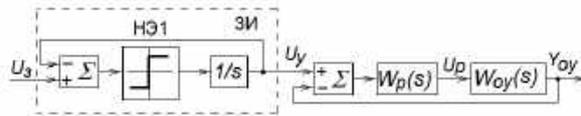


Рис. 1. Структура неуправляемого задатчика интенсивности: ЗИ – задатчик интенсивности с нелинейным элементом НЭ1;  $W_P(s)$  – передаточная функция регулятора;  $W_{Oy}(s)$  – передаточная функция объекта управления;  $U_3$  – задающий сигнал;  $U_y$  – выходной сигнал задатчика интенсивности;  $U_p$  – выходной сигнал регулятора;  $U_{Oy}$  – выход объекта управления

Переходные характеристики САУ со статическим объектом второго порядка и ПИ-регулятором приведены на рис. 2. Ограничение выхода регулятора  $\pm 10$ . Передаточная функция объекта управления взята со следующими параметрами:

$$W(s) = \frac{K_{Oy}}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)} = \frac{1}{(1 + s)(1 + 0.1s)}. \quad (1)$$

Передаточная функция регулятора, обеспечивающая перерегулирование в линейной САУ 10% [10]:

$$W_P(s) = \frac{K_P(1 + T_Ps)}{s} = \frac{7(1 + s)}{s}. \quad (2)$$

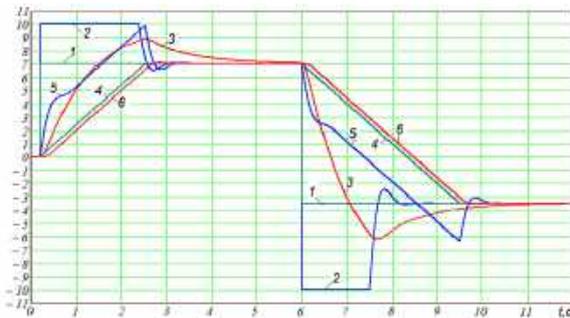


Рис. 2. Переходные характеристики САУ с ПИ-регулятором: 1 – управление; 2 – выход регулятора, 3 – выход объекта управления в САУ без задатчика интенсивности; 4 – управление; 5 – выход регулятора; 6 – выход объекта управления в САУ с неуправляемым задатчиком интенсивности

На рис. 2 видно, что при отсутствии задатчика интенсивности заход регулятора в область насыщения увеличивает перерегулирование и существенно затягивает переходный процесс за счет свободных движений регулятора. Интенсивность задатчика выбрана из условия кратковременного достижения ограничения управления в худшей ситуации.

Введение задатчика интенсивности существенно уменьшило перерегулирование. Однако переходный процесс затягивается из-за неполного использования форсировки управления.

**2. Анализ управляемого задатчика интенсивности**

Авторами предлагается следующая структура САУ с управляемым задатчиком интенсивности (рис. 3):

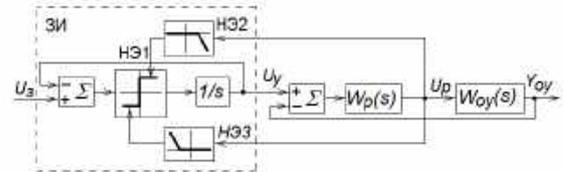


Рис. 3 Структура управляемого задатчика интенсивности: НЭ2 – нелинейный элемент, определяющий увеличение темпа управляющего сигнала; НЭ3 – нелинейный элемент, определяющий уменьшение темпа управляющего сигнала

Ниже рассматривается устойчивость контура ограничения темпа изменения управляющего сигнала для ПИ и ПИД регуляторов.

**2.1. Устойчивость контура изменения темпа управляющего сигнала для ПИ-регулятора**

Линеаризованная структура контура изменения темпа управляющего сигнала для ПИ и ПИД регулятора приведена на рис. 4.

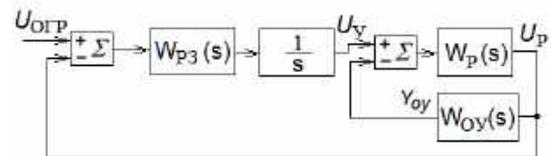


Рис. 4 Линеаризованная структура контура изменения темпа управляющего сигнала для ПИ и ПИД регуляторов:  $W_{P3}(s)$  – передаточная функция регулятора задатчика интенсивности;  $U_{огр}$  – уровень ограничения выхода регулятора

Если передаточные функции объекта управления и регулятора описываются выражениями (1) и (2), соответственно, то передаточная функция разомкнутого контура управления задатчиком интенсивности (без учета регулятора задатчика) имеет вид:

$$W_o(s) = \frac{W_P(s)}{s(1 + W_P(s) \cdot W_{Oy}(s))} = \frac{K_P(1 + T_Ps)}{s^2 \left( 1 + \frac{K_P K_{Oy}}{s(1 + T_2s)} \right)} = \frac{1}{K_{Oy}} \frac{(1 + T_Ps)(1 + T_2s)}{s \left( 1 + \frac{s}{K_{Oy} K_P} + \frac{T_2 s^2}{K_{Oy} K_P} \right)}. \quad (3)$$

Для параметров формул (1) и (2) логарифмические частотные характеристики приведены на рис. 5.

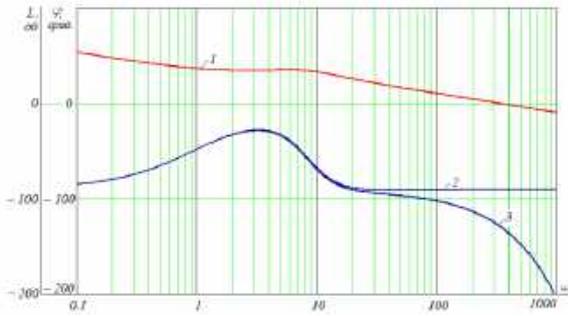


Рис. 5 Логарифмические частотные характеристики контура управления задатчиком без учета передаточной функции регулятора задатчика интенсивности: 1 – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика; 2 – логарифмическая фазо-частотная характеристика по формуле (3); 3 – логарифмическая фазо-частотная характеристика с учетом цифровой реализации ПИ-регулятора с дискретностью по времени 0.002 с

Из рис. 5 следует, что регулятор задатчика интенсивности может быть пропорциональным или пропорционально-интегральным.

На рис. 6 приведены переходные характеристики астатического объекта с ПИ-регулятором и управляемым задатчиком интенсивности при пропорциональном регуляторе задатчика с коэффициентом управления задатчиком  $K_3 = 0.1$ . Остальные параметры САУ остались прежними.

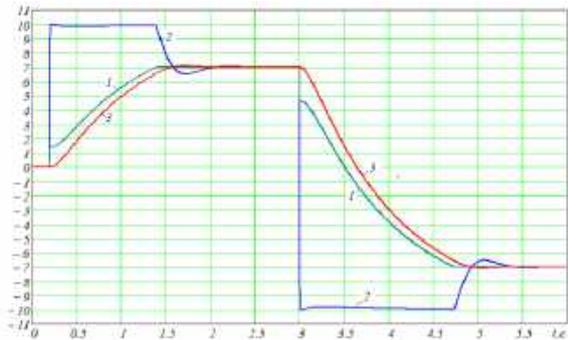


Рис. 6 Переходные характеристики астатического объекта с ПИ-регулятором и управляемым задатчиком интенсивности: 1 – выход задатчика интенсивности; 2 – выход регулятора; 3 – выход объекта управления.

Видно, что переходный процесс близок к оптимальному по быстродействию, так как полностью используется форсировочная возможность регулятора, а перерегулирование составляет 1.1%.

В результате полного использования форсировочных возможностей управления время переходного процесса снизилось с 2,6 с (для неуправляемого задатчика) до 1,6 с (при управляемом задатчике).

### 2.2. Устойчивость контура изменения темпа управляющего сигнала для ПИД-регулятора

Передаточная функция объекта управления в общем виде имеет вид:

$$W(s) = \frac{K_{OY}}{(1 + a_1s + a_2s^2)(1 + T_3s)} = \frac{1}{(1 + 2.05s + 1.05s^2)(1 + 0.1s)} \quad (4)$$

Передаточная функция ПИД-регулятора компенсирует полином второго порядка в передаточной функции объекта управления:

$$W_P(s) = \frac{K_P \cdot (1 + b_1s + b_2s^2)}{s \cdot (1 + T_Ms)} = \frac{6 \cdot (1 + 2.05s + 1.05s^2)}{s \cdot (1 + 0.1s)}, \quad (5)$$

где  $T_M$  – малая постоянная времени, позволяющая реализовать ПИД-регулятор.

Передаточная функция разомкнутого контура управления задатчиком интенсивности (без учета регулятора задатчика) имеет вид:

$$W_o(s) = \frac{W_P(s)}{s \cdot (1 + W_P(s) \cdot W_{OY}(s))} = \frac{K_P \cdot (1 + b_1s + b_2s^2) \cdot (1 + T_3s)}{s \cdot (K_P K_{OY} + s + (T_3 + T_M) \cdot s^2 + T_3 T_M s^3)} \quad (6)$$

На рис. 7 приведены частотные характеристики, соответствующие уравнению (6), при параметрах, соответствующих уравнениям (4) и (5).

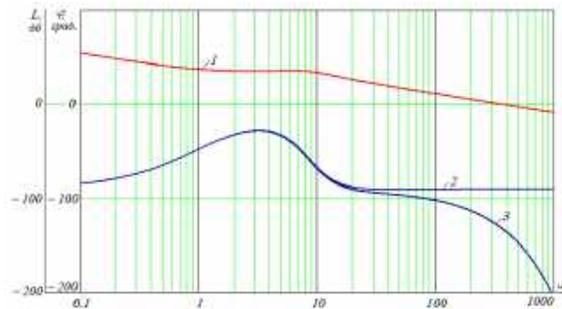


Рис. 7 Логарифмические частотные характеристики контура управления задатчиком без учета передаточной функции регулятора задатчика интенсивности: 1 – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика; 2 – логарифмическая фазо-частотная характеристика по формуле (6); 3 – логарифмическая фазо-частотная характеристика с учетом цифровой реализации ПИД-регулятора с дискретностью по времени 0.002 с

Частотные характеристики контура управления задатчиком для ПИ и ПИД регуляторов похожи, так как похожи оставшиеся (не скомпенсированные) части передаточных функций. В качестве регулятора контура управления задатчиком  $W_{P3}(s)$  может быть выбран П или ПИ регулятор.

На рис. 8 приведены переходные характеристики САУ с ПИД-регулятором и управляемым задатчиком интенсивности. На рис. 9 приведена реакция САУ с ПИД-регулятором на гармоническое управляющее задание.

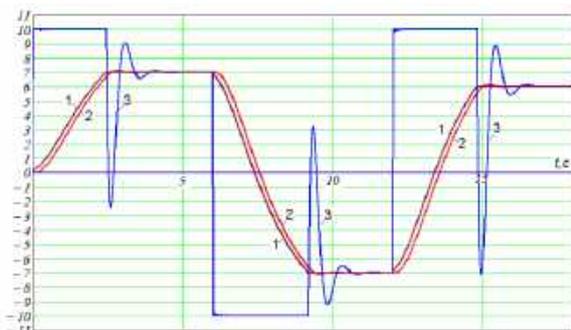


Рис. 8 Переходные характеристики астатического объекта с ПИД-регулятором и управляемым задатчиком интенсивности: 1 – выход задатчика интенсивности; 2 – выход объекта управления; 3 – выход регулятора

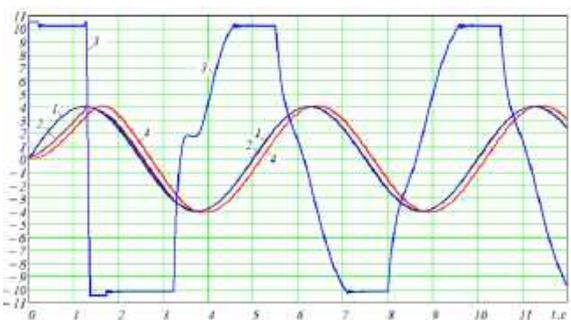


Рис. 9 Реакция САУ с ПИД-регулятором на гармоническое управляющее задание: 1 – задающий сигнал; 2 – выход задатчика интенсивности; 3 – выход ПИД-регулятора; 4 – выход объекта управления

### 3. Результаты

Математическое исследование управляемого задатчика интенсивности подтвердило возможность реализации предложенной структуры. Полученные передаточные функции разомкнутого контура управления задатчиком позволяют математически обосновано выполнить синтез регулятора в этом контуре.

Цифровое моделирование САУ с ПИ и ПИД регуляторами подтвердило эффективность управления задатчиком интенсивности.

Поведение САУ при ступенчатом изменении управления близко с оптимальному по быстродействию, число знакопеременных интервалов в выходном сигнале регуляторов равно порядку объекта управления.

На первом интервале выход регуляторов предельный, что обеспечивает при малой величине перерегулирования высокое быстродействие САУ.

САУ хорошо реагирует на гармоническое управление, обеспечивая максимальную форсировку сигнала, поступающего на вход объекта управления.

### Заключение

Введение управления в задатчик интенсивности позволило увеличить быстродействие САУ, одновременно исключив «интегральное насыщение» как для ПИ, так и для ПИД регуляторов.

Получены передаточные функции разомкнутого контура управления задатчиком, позволяющие синтезировать регулятор, управляющий задатчиком.

Проверена работоспособность и эффективность управляемого задатчика при различных законах управления САУ.

Введение задатчика интенсивности не влияет на поведение САУ при внешних возмущающих воздействиях.

### Литература

1. K. V. Chupina and V. K. Usoltsev, "Fuzzy control electric drive for a vessel descent-rise device," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076323.
2. K V Chupina et al 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1015 0321677. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032167
3. K. V. Chupina, E. V. Kataev and I. A. Sennikov, "Robust Control System for Vessel Descent-Rise Device with Heave Compensation Capability," 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728832.
4. K V Chupina et al 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2032 012056. DOI:10.1088/1742-6596/2032/1/012056
5. Усольцев В.К. Влияние насыщения регулятора на переходный процесс в системе автоматического управления // Научный альманах 2016. № 2-2(16). Тамбов, 2016. 411-419 с.
6. Ханнанов А.М., Усольцев В.К., Чупина К.В. Повышение астатизма системы автоматического управления путем введения положительной обратной связи // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 2(43). С. 67–76. DOI: dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-7.
7. Jian Liu et al 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2033 012189
8. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66-74.
9. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1. С. 78-88.
10. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М. изд. МЭИ, 2004, 400 с.

### References

1. K. V. Chupina and V. K. Usoltsev, "Fuzzy control electric drive for a vessel descent-rise device," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076323.
2. K V Chupina et al 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1015 0321677. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032167

3. K. V. Chupina, E. V. Kataev and I. A. Sennikov, "Robust Control System for Vessel Descent-Rise Device with Heave Compensation Capability," 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728832
4. K V Chupina *et al* 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2032 012056. DOI:10.1088/1742-6596/2032/1/012056
5. Usoltsev V.K. Vliyaniye nasy`shheniya regulyatora na perexodny`j process v sisteme avtomaticheskogo upravleniya [Effect of controller's integral windup on control system's transients] / Nauchny`j al`manax 2016. № 2-2(16). Tambov, 2016. 411-419 s.
6. Khannanov A., Usoltcev V., Chupina K. Povy`sheniye astatizma sistemy` avtomaticheskogo upravleniya putem vvedeniya polozhitel`noj obratnoj svyazi [Increasing the astatism of the automatic control system by introducing positive feedback] / Vestnik Inzhenernoj shkoly` DVFU. 2020. № 2(43). S. 67–76. DOI: dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-7.
7. Jian Liu *et al* 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2033 012189
8. Denisenko V.V. PID-regulyatory` : principy` postroeniya i modifikacii [PID controllers: principles of construction and modification] / Sovremennyye tekhnologii avtomatizacii. 2006. № 4. S. 66-74
9. Denisenko V.V. PID-regulyatory` : principy` postroeniya i modifikacii [PID controllers: principles of construction and modification] / Sovremennyye tekhnologii avtomatizacii. 2007. № 1. S. 78-88
10. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control theory]. M. izd. ME`I, 2004, 400 s.

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

**Валерий Константинович Усольцев**, кандидат технических наук, доцент, доцент отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: usvalerij@yandex.ru

**Valery K. Usoltsev**, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transportation, Far Eastern Federal University, Ajax village, 10, i. Russian, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russian Federation, e-mail: usvalerij@yandex.ru

**Кира Владимировна Чупина**, кандидат технических наук, доцент, доцент отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: chupina.kv@dvfu.ru

**Kira V. Chupina**, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transportation, Far Eastern Federal University, Ajax village, 10, i. Russian, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russian Federation, e-mail: chupina.kv@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 03.08.2022.

Научная статья

УДК 621.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.043>

## Логико-вероятностное моделирование надежности удаленного автоматизированного радиотехнического поста Системы управления движением судов

Н.В. Старжинская<sup>1</sup> karbovets\_n@mail.ru, А.И. Чернова<sup>1</sup> ruzhay\_ann@mail.ru

<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** Важнейшим аспектом обеспечения непрерывной работы Системы управления движением судов является поддержание в работоспособном состоянии входящего в её состав радиоэлектронного оборудования, в частности радиооборудования удаленных радиотехнических постов. В работе приведена модель прогнозирования надежности автоматизированного радиотехнического поста Системы управления движением судов (АРТП СУДС) с использованием логико-вероятностного метода. Составлен сценарий опасного состояния (отказа автоматизированного радиотехнического поста), получена вероятностная функция опасного состояния и определены наиболее вероятные причины отказа, а также инициирующие события, приносящие наибольший ущерб. Представленная в работе математическая модель позволяет на основе составленного сценария опасного состояния определить вероятность возникновения критической ситуации – отказа удаленного АРТП СУДС, а также получить количественные значения по критериям «значимость», «вклад» и «ущерб» инициирующих событий, позволяющие определить наиболее ненадежные элементы, влияющие на общую надежность системы.

**Ключевые слова:** сценарий опасного состояния, логико-вероятностный метод, эксплуатационная надежность, техническое обслуживание, ремонт, значимость, вклад, ущерб.

**Для цитирования:** Старжинская Н.В., Чернова А.И. Логико-вероятностное моделирование надежности удаленного автоматизированного радиотехнического поста Системы управления движением судов. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 333—339.

**Original article**

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.043>

## Logical-probabilistic modeling of reliability of a remote automated radio engineering post of a Vessel Traffic System

Natalya V. Starzhinskaya<sup>1</sup> karbovets\_n@mail.ru, Anna I. Chernova<sup>1</sup> ruzhay\_ann@mail.ru

<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

**Abstract.** The most important aspect of ensuring the continuous operation of the Vessel Traffic System is the maintenance in working state of the radio-electronic equipment included in its composition, in particular the radio equipment of remote radio engineering posts. The paper presents a model for predicting the reliability of an automated radio engineering post of a Vessel Traffic System using a logical-probabilistic method. A scenario of a dangerous state (the failure of an automated radio engineering post) has been compiled, a probabilistic function of a dangerous state has been obtained and the most probable causes of failure, as well as the initiating events that cause the greatest damage, have been determined. The mathematical model presented in the paper allows, based on the compiled scenario of a dangerous state, to determine the probability of a critical situation – the failure of a remote automated radio engineering post of the VTS, as well as to obtain quantitative values according to the criteria "significance", "contribution" and "damage" of initiating events, which allow to determine the most unreliable elements affecting the overall reliability of the system.

**Key words:** scenario of a dangerous state, logical-probabilistic method, operational reliability, maintenance, repair, significance, contribution, damage.

**For citation:** Natalya V. Starzhinskaya, Anna I. Chernova Logical-probabilistic modeling of reliability of a remote automated radio engineering post of a Vessel Traffic System. 2022. № 3 part 1. P. 333—339.

### Введение

Важнейшей задачей при эксплуатации морского флота является обеспечение безопасности мореплавания. Что, в свою очередь, в значительной степени обеспечивается применением берегового радиоэлектронного оборудования (РЭО) контроля за движением судов в порту, входящего в состав Системы управления движением судов (СУДС). В состав СУДС порта Новоросийск входит Центр управления движением судов (ЦУДС) с системой дистанционного контроля за состоянием

оборудования и автоматизированные радиотехнические посты (АРТП), расположенные на мысах Пенай, Дооб и в с.Южная Озереевка. Радиотехнический пост оборудован радиолокационной станцией (РЛС), радиорелейной станцией (РРС), УКВ-радиостанцией, системой видеонаблюдения, для визуального контроля акватории порта. Один из АРТП оборудован автоматической идентификационной системой (АИС) [1, 2].

Эффективное функционирование СУДС и, в частности, удаленных АРТП, может быть обеспечено лишь в случае высокой надежности и отказоустойчивости ее радиооборудования. Согласно техническим требованиям, коэффициент готовности радиоэлектронного оборудования СУДС должен быть на уровне 0,999 [3].

**Постановка задачи**

В работе надежность и возможный отказ автоматизированного РТП рассматриваются с позиций сценарного описания состояний рассматриваемой системы. Важнейшим аспектом, как уже было сказано выше, является обеспечение работоспособности радиоэлектронного оборудования радиотехнических постов. Наиболее эффективным способом предотвращения аварийной ситуации (отказа оборудования) является своевременное прогнозирование критического состояния, после которого возможно наступление отказа, а также своевременное проведение соответствующих мероприятий по техническому обслуживанию (ТО) [4, 5].

Цель работы состоит в применении логико-вероятностной модели, которая позволит дать не только численную оценку эксплуатационной надежности структурно-сложного

автоматизированного РТП, но и позволит выделить среди всего многообразия элементов те, чей вклад в возникновение отказа (аварийной ситуации) является наиболее значимым.

Основным элементом предлагаемой количественной модели является составление сценария опасного состояния и выявление основных его структурных составляющих. В первую очередь, модель содержит основное событие, называемое фокусом, которое интерпретируется как аварийная ситуация. Модель также содержит цепь причинно-взаимосвязанных событий, которые предшествуют основному результирующему событию. К таким событиям относятся отказы технических средств, отказы программного обеспечения (ПО), отказ системы удаленной диагностики состояния РЭО и т.д. Сценарная модель в своем составе содержит логические связи между переменными, интерпретируемыми как события-предпосылки, ведущие к аварийной ситуации [6, 7, 8, 9].

**Составление сценария опасного состояния**

Разработанная схема сценария опасного состояния (дерево отказов), отказа автоматизированного РТП СУДС, приведена на рис. 1.

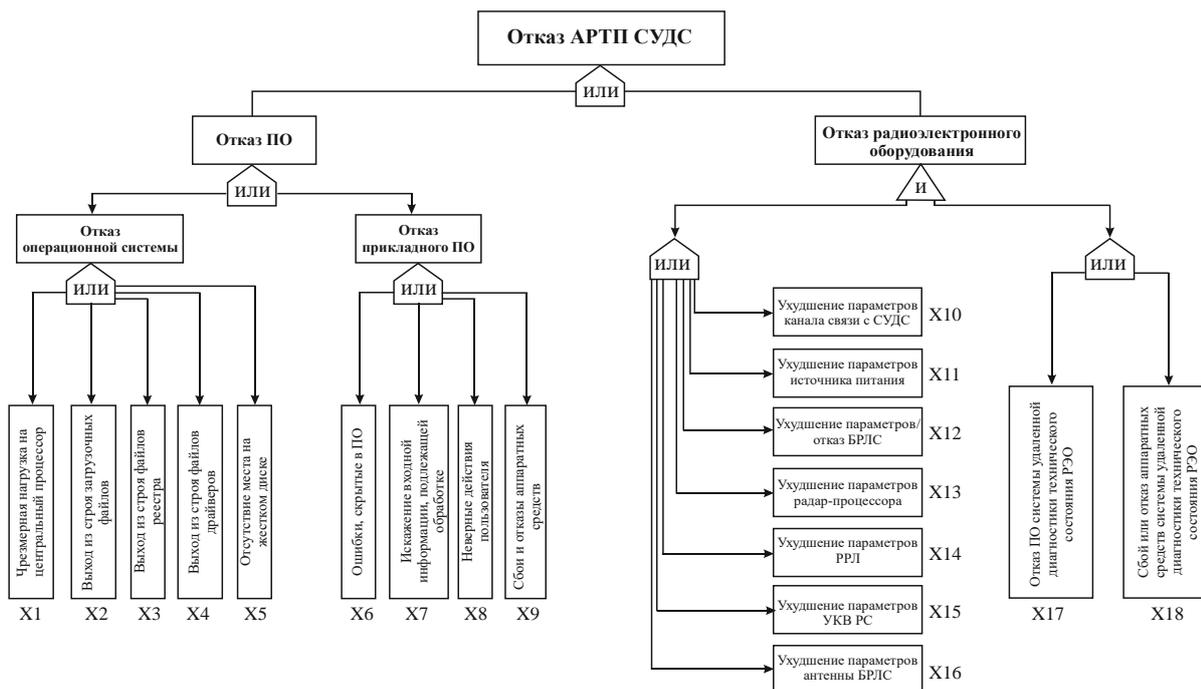


Рис. 1. Схема сценария опасного состояния отказа АРТП СУДС

На основе дерева отказов, представленного на рис.1, составим логическую функцию опасного состояния (рис.2).

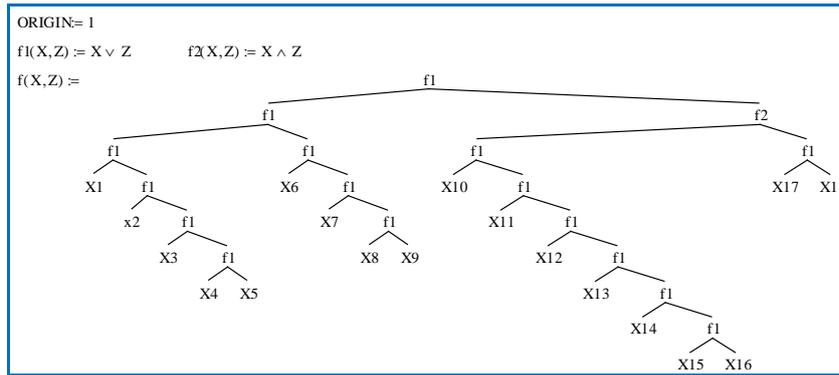


Рис. 2. Логическая функция опасного состояния

Функция опасного состояния (ФОС):

$$f(X_1, \dots, X_{18}) = X_1 \vee X_2 \vee X_3 \vee X_4 \vee X_5 \vee X_6 \vee X_7 \vee X_8 \vee X_9 \vee (X_{10} \vee X_{11} \vee X_{12} \vee X_{13} \vee X_{14} \vee X_{15} \vee X_{16}) \wedge (X_{17} \vee X_{18}) \quad (1)$$

Перепишем выражение (1) в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ):

$$f(X_1, \dots, X_{18}) = X_1 \vee X_2 \vee X_3 \vee X_4 \vee X_5 \vee X_6 \vee X_7 \vee X_8 \vee X_9 \vee X_{10}X_{17} \vee X_{11}X_{17} \vee X_{12}X_{17} \vee X_{13}X_{17} \vee X_{14}X_{17} \vee X_{15}X_{17} \vee X_{16}X_{17} \vee X_{10}X_{18} \vee X_{11}X_{18} \vee X_{12}X_{18} \vee X_{13}X_{18} \vee X_{14}X_{18} \vee X_{15}X_{18} \vee X_{16}X_{18}. \quad (2)$$

После составления ФОС можно определить вероятность возникновения опасной ситуации (отказа АРТП СУДС). Для этого необходимо преобразовать

$$f(x_1, x_2, \dots, x_{16}) =$$

$\overline{x_1}$																			
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$																		
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$																	
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$																
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$															
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$														
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$	$\overline{x_7}$													
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$	$\overline{x_7}$	$\overline{x_8}$												
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$	$\overline{x_7}$	$\overline{x_8}$	$\overline{x_9}$											
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$	$\overline{x_7}$	$\overline{x_8}$	$\overline{x_9}$	$\overline{x_{10}x_{17}}$										
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$	$\overline{x_7}$	$\overline{x_8}$	$\overline{x_9}$	$\overline{x_{10}x_{17}}$	$\overline{x_{11}x_{17}}$									
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$	$\overline{x_7}$	$\overline{x_8}$	$\overline{x_9}$	$\overline{x_{10}x_{17}}$	$\overline{x_{11}x_{17}}$	$\overline{x_{12}x_{17}}$								
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$	$\overline{x_7}$	$\overline{x_8}$	$\overline{x_9}$	$\overline{x_{10}x_{17}}$	$\overline{x_{11}x_{17}}$	$\overline{x_{12}x_{17}}$	$\overline{x_{13}x_{17}}$							
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$	$\overline{x_7}$	$\overline{x_8}$	$\overline{x_9}$	$\overline{x_{10}x_{17}}$	$\overline{x_{11}x_{17}}$	$\overline{x_{12}x_{17}}$	$\overline{x_{13}x_{17}}$	$\overline{x_{14}x_{17}}$						
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\overline{x_3}$	$\overline{x_4}$	$\overline{x_5}$	$\overline{x_6}$	$\overline{x_7}$	$\overline{x_8}$	$\overline{x_9}$	$\overline{x_{10}x_{17}}$	$\overline{x_{11}x_{17}}$	...	...	...	...	...	$\overline{x_{15}x_{18}}$	$\overline{x_{16}x_{18}}$		

Далее преобразуем полученную функцию к вероятностной функции и определим вероятность возникновения отказа АРТП [8]:



Графическое представление полученных результатов приведено на рис.3–5.

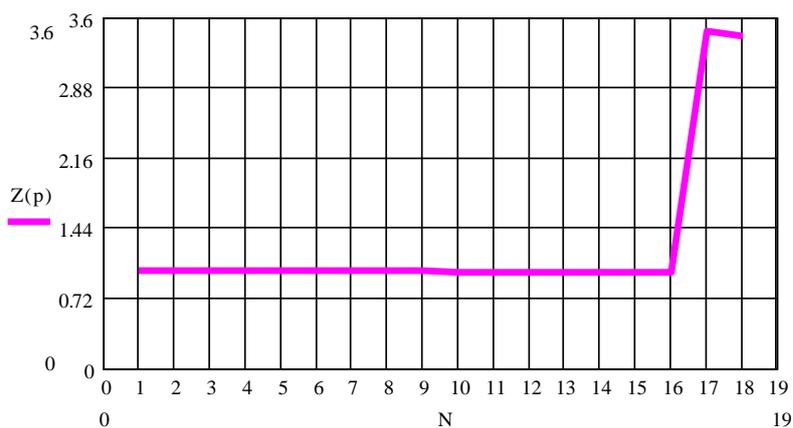


Рис. 3. Значимость инициирующих событий

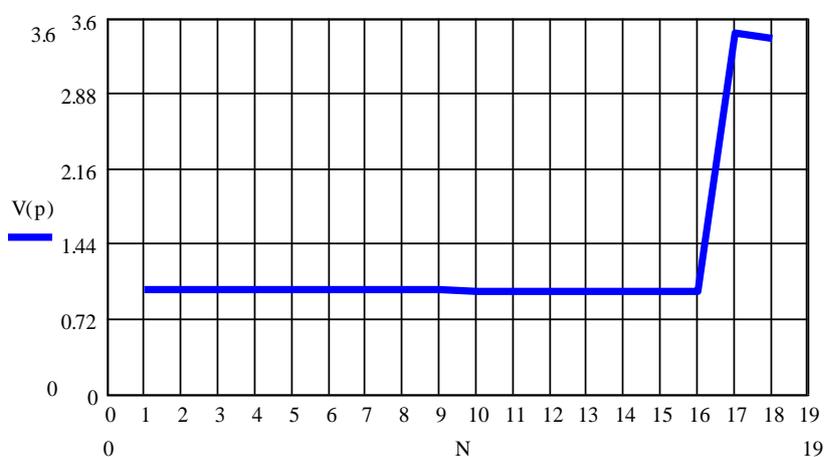


Рис. 4. Вклад инициирующих событий

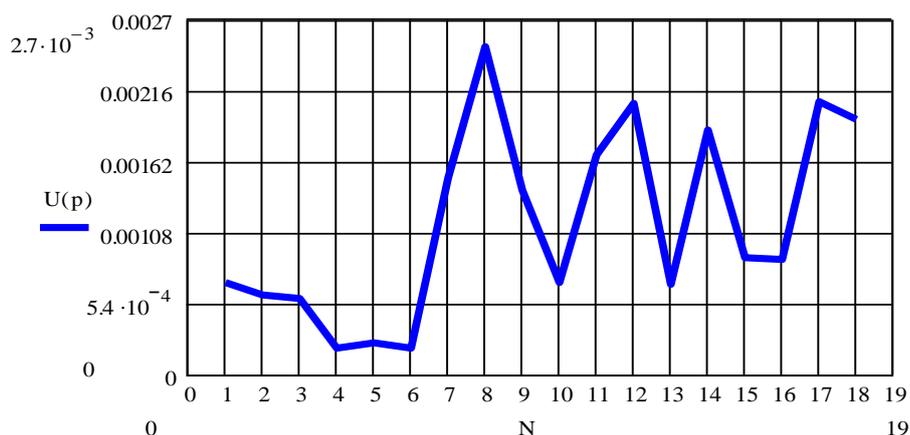


Рис. 5. Ущерб инициирующих событий

Сравнивая полученные результаты расчетов по значимости, вкладу и ущербу, можно выделить инициирующие события, оказывающие наибольшее и наименьшее влияние на возникновение аварийной ситуации (отказа автоматизированного РТП СУДС). По полученным результатам можно сделать вывод, что наиболее вероятными причинами отказа

автоматизированного РТП СУДС, а также приносящими наибольший ущерб являются:

- неверные действия пользователя (X8);
- ухудшение параметров источника питания (X11);
- ухудшение параметров/отказ РЛС (X12);
- ухудшение параметров РРЛ (X14);

–отказ ПО удаленной системы диагностики состояния РЭО (X17);  
 –сбой или отказ аппаратных средств удаленной системы диагностики состояния РЭО (X18).

### Заключение

Представленная математическая модель позволила на основе составленного сценария опасного состояния и значений вероятностей инициирующих событий определить вероятность возникновения критической ситуации – отказа АРТП

СУДС. Полученные результаты позволили выявить наиболее вероятные причины возникновения отказа, а также события, приносящие наибольший ущерб. Рассчитанные значения по критериям «значимость», «вклад» и «ущерб» инициирующих событий, входящие в показатель надежности удаленного АРТП СУДС  $P_{АРТП}$ , дают более точное представление о наиболее ненадежных элементах системы, которые вносят существенный вклад в общую надежность АРТП. Это, в свою очередь, позволяет оценить перспективы по уменьшению их влияния и повышению безопасности мореплавания.

### Литература

1. Чернова А.И., Старжинская Н.В. Многопараметрическая диагностика технического состояния пространственно-распределенных радиотехнических постов СУДС // Морские интеллектуальные технологии. Труды Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2021. № 2, том 4. С. 102–108.
2. Buzenkov I.I., Tyufanova A.A., Khaleeva E.P. On the possibility of organizing communication for E-navigation in the coastal zone using radio-technical posts of the Vessel Traffic Control System. Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021" 2021.
3. Приказ от 23 июля 2015 г. №226 Об утверждении требований к радиолокационным системам управления движением судов, объектам инфраструктуры морского порта, необходимым для функционирования глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности, объектам и средствам автоматической информационной системы, службе контроля судоходства и управления судоходством URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 11.02.2022).
4. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 246 с.: ил.
5. Боран-Кешишьян А.Л., Замоленов М.В., Флоря П.Н., Ярошенко А.А., Кондратьев С.И. Функционирование технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4-1(54). – С. 258-264. – DOI 10.37220/MIT.2021.54.4.061. – EDN PММОНМ.
6. Рябинин И.А. Логико-вероятностный метод и его современные возможности // БИОСФЕРА. Международный научный и практический журнал. Том 2. №1. Санкт-Петербург. 2010. С.23-38.
7. Можаяев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. – СПб.: ВИТУ, 2000. – 145 с.
8. Черкесов, Г.Н., Можаяев А.С. Логико-вероятностные методы расчета надежности структурно-сложных систем. Качество и надежность изделий. – М.: Знание, 1991. – 340 с.
9. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Николаев Н.И., Хекерт Е.В. Контроль и управление коммутационными состояниями электрических сетей // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1-2 (43). – С. 46-54.
10. Левин В.И. Логические методы исследования надежности сложных систем. Часть I. Математический аппарат и модели надежности // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 150 – 183.
11. Рябинин И.А., Струков А.В. Решение одной задачи оценки надежности структурно-сложной системы разными логико-вероятностными методами // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах. Труды Международной научной школы МАБР-2019, 2019. С. 159-172.

### References

1. Chernova A.I., Starzhinskaya N.V. Mnogoparametricheskaya diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya prostranstvenno-raspredeleennykh radiotekhnicheskikh postov SUDS [Multiparametric diagnostic of technical condition of spatially distributed radio technical posts of VTS]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. Trudy Gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova, 2021. № 2, tom 4. S. 102-108.
2. Buzenkov I.I., Tyufanova A.A., Khaleeva E.P. On the possibility of organizing communication for E-navigation in the coastal zone using radio-technical posts of the Vessel Traffic Control System. Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021" 2021.
3. Prikaz ot 23 iyulya 2015 g. №226 Ob utverzhdenii trebovaniy k radiolokatsionnym sistemam upravleniya dvizheniem sudov, ob"ektam infrastruktury morskogo porta, neobkhodimym dlya funktsionirovaniya global'noy morskoy sistemy svyazi pri bedstvii i dlya obespecheniya bezopasnosti, ob"ektam i sredstvam avtomaticheskoy informatsionnoy sistemy, sluzhbe kontrolya sudokhodstva i upravleniya sudokhodstvom [On the approval of requirements for radar systems for the Vessel traffic system, seaport infrastructure facilities necessary for the operation of the Global Maritime Distress and Safety System, facilities and means of the automatic identification system, the navigation control and navigation management service] URL: <http://www.consultant.ru> (data obrashcheniya 11.02.2022).
4. Ryabinin I.A. Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem [Reliability and safety of structurally complex systems] SPb.: Politekhnik, 2000, 246 s.: il.
5. Boran-Keshish'jan A.L., Zamorenov M.V., Florja P.N., Jaroshenko A.A., Kondrat'ev S.I. Funkcionirovanie tekhnicheskoy sistemy s mgnovenno popolnjaemym rezervom vremeni s uchetom profilaktiki [Functioning of a technical system with an instantly replenished time reserve, taking into account preventive maintenance] Morskie

- intellektual'nye tehnologii. – 2021. – № 4-1(54). – S. 258-264. – DOI 10.37220/MIT.2021.54.4.061. – EDN PММОНМ.
6. Rjabinin I.A. Logiko-verojatnostnyj metod i ego sovremennye vozmozhnosti [The logical-probabilistic method and its modern capabilities] BIOSFERA. Mezhdunarodnyj nauchnyj i praktičeskij zhurnal. Tom 2. №1. Sankt-Peterburg. 2010. S.23-38.
  7. Mozhaev A.S., Gromov V.N. Teoreticheskie osnovy obščego logiko-veroyatnostnogo metoda avtomatizirovannogo modelirovaniya sistem [Theoretical foundations of the general logic-probabilistic method of automated system modeling] SPb.: VITU, 2000, 145 s.
  8. Cherkosov, G.N., Mozhaev A.S. Logiko-verojatnostnye metody rasčeta nadezhnosti strukturno-složnyh sistem. Kachestvo i nadežnost' izdelij [Logical-probabilistic methods for calculating the reliability of structurally complex systems. Quality and reliability of products] M.: Znanie, 1991, 340 s.
  9. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Nikolaev N.I., Hekert E.V. Kontrol' i upravlenie kommutacionnymi sostojanijami jelektricheskij setej [Control and management of the switching conditions electric networks] Morskije intellektual'nye tehnologii. 2019. № 1-2 (43). S. 46-54.
  10. Levin V.I. Logičeskie metody issledovanija nadežnosti složnyh sistem. Čast' I. Matematičeskij apparat i modeli nadežnosti [Logical methods for investigating the reliability of complex systems. Part I. Mathematical apparatus and reliability models] Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2018. № 3. S. 150-183.
  11. Rjabinin I.A., Strukov A.V. Reshenie odnoj zadachi ocenki nadežnosti strukturno-složnoj sistemy raznymi logiko-verojatnostnymi metodami [Solving one problem of assessing the reliability of a structurally complex system by different logical-probabilistic methods] Modelirovanie i analiz bezopasnosti i riska v složnyh sistemah. Trudy Mezhdunarodnoj nauchnoj shkoly MABR-2019, 2019. S. 159-172.

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

**Наталья Викторовна Старжинская**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: karbovets\_n@mail.ru

**Natalya V. Starzhinskaya**, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: karbovets\_n@mail.ru

**Анна Ивановна Чернова**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: ruzhay\_ann@mail.ru

**Anna I. Chernova**, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: ruzhay\_ann@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 31.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 06.08.2022.

Научная статья

УДК [539.374+624.044.3]:622.276.04

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.044>

## Численное моделирование формирования разжимных соединений свай с основаниями морских стационарных платформ и их работоспособности

Г.Б. Крыжевич<sup>1,2</sup> g\_kryzhevich@ksrc.ru, А.Р. Филатов<sup>2,3</sup> filatov\_ar@voenmeh.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

<sup>2</sup>Крыловский государственный научный центр

<sup>3</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

**Аннотация.** Объектами работы являются узлы соединения свай с опорными конструкциями морских стационарных платформ (МСП). Актуальность работы связана с обнаружением на некоторых объектах трещин, вызванных формированием этих соединений. Цель работы состоит в выявлении на основе численного моделирования гидроразжима свай рациональных технологических параметров процесса их крепления к направляющим опорных блоков, применяемых в конструкциях МСП. Для этого выполнялось численное моделирование процесса гидравлического разжима методом конечных элементов. Учёт пластического деформирования свай выполнен с применением линейной кинематической модели упрочнения с рассмотрением нескольких вариантов модуля упрочнения. В результате получены диаграммы вытягивания свай из опор при различных значениях рабочего давления гидроразжима. Для двух различных модулей упрочнения получены оптимальные значения рабочего давления. Анализ полученных результатов говорит о высокой чувствительности задачи к значению модуля пластического упрочнения и его определяющем влиянии на оптимальное значение рабочего давления гидроразжима.

**Ключевые слова:** морские стационарные платформы, сваи, численное моделирование, метод конечных элементов, пластическое деформирование

**Для цитирования:** Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Численное моделирование формирования разжимных соединений свай с основаниями морских стационарных платформ и их работоспособности. 2022. № 3 часть 1, С. 340—345.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.044>

## Numerical modeling for forming of expanding joints of piles with the foundations of fixed offshore platforms and their operating capacity

Gennady B. Kryzhevich<sup>1,2</sup> g\_kryzhevich@ksrc.ru, Anton R. Filatov<sup>2,3</sup> filatov\_ar@voenmeh.ru

<sup>1</sup>State marine technical university of Saint-Petersburg

<sup>2</sup>Krylov State Research Centre

<sup>3</sup>Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F. Ustinov

**Abstract.** The work studies joints of piles with the supporting structures of fixed offshore platforms (FOP). The relevance of the work is related to detection of cracks in some joints caused by these joints formation. The work aims to identify rational process parameters of their fastening to guides of support blocks used in FOP structures through numerical simulation of piles hydraulic expansion. To this effect hydraulic expansion was simulated numerically by the finite element method. Piles plastic deformation was accounted for using a linear kinematic hardening model with consideration of several hardening modulus options. As a result, diagrams of piles pulling from supports were obtained at various hydraulic expansion pressure values. Optimal working pressure values were obtained for two different hardening moduli. Analysis of the obtained results shows high problem sensitivity to the plastic hardening modulus value and its decisive influence on the optimal hydraulic expansion pressure value.

**Key words:** fixed offshore platform, pile, numerical modeling, finite element method, plastic deformation

**For citation:** Gennady B. Kryzhevich, Anton R. Filatov, Numerical modeling for forming of expanding joints of piles with the foundations of fixed offshore platforms and their operating capacity, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 340—345.

### Введение

В настоящее время для соединения конструкций стационарных нефтегазодобывающих платформ и других морских сооружений с трубчатыми цилиндрическими сваями применяется технология гидравлического разжима, основанная на пластическом деформировании оголовков свай, при котором обеспечивается их плотный контакт с относительно жесткими гильзами (направляющими свай), неподвижно закрепленными на платформах.

При формировании такого разжимного соединения (РС) сваи и гильзы часто реализуется технология компании «Oil States International, Inc.», провайдером которой является фирма «Hydra-Lok», аккредитованная в 1993 году на соответствие стандарту BS5750 Часть 1 (ISO 9001, EN29001) в части конструктивных решений, изготовления и эксплуатации устройств соединения и высаживания свай. РС типа «Hydra-Lok Swaged Connection Systems» [1] достигается за счет расширения внутренней трубы (сваи) в радиальном направлении

до зацепления с гильзой (направляющей) с одновременным заполнением кольцевых полостей гильзы материалом сваи и образования значительной поверхности контакта гильзы и сваи путем непосредственного приложения внутреннего гидравлического давления (см. рис. 1). Для создания этого давления и выполнения РС используется предложенный компанией специальный инструмент для гидроразжима, обеспечивающий одновременно центровку (соосность оголовка сваи и гильзы) и уплотнение системы на верхних и нижних границах зоны высокого давления жидкости (уплотнительные устройства показаны на рис. 1 в виде двух черных колец, закрепленных на инструменте).

Целью настоящей работы является выявление на основе численного моделирования гидроразжима свай рациональных технологических параметров процесса их крепления к направляющим опорных блоков, обеспечивающих использование на отечественных морских стационарных платформах (МСП) при формировании РС технологии, подобной применяемой компанией «Oil States International, Inc.».

Для достижения поставленной цели выполнено численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) следующих процессов:

- гидроразжима сваи (точнее, РС) при различных значениях рабочего давления с последующей разгрузкой для выявления рациональных технологических параметров операции пластического деформирования;
- вытягивания сваи из направляющей для построения зависимости между осевой силой и взаимным смещением гильзы и сваи (диаграммы вытягивания сваи из гильзы), оценки предельной осевой силы, выдерживаемой РС, и качества крепления свай к направляющим опорных блоков.

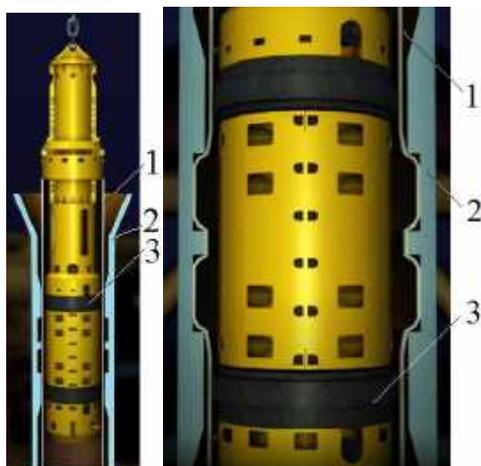


Рис. 1. Схемы расположения сваи 1, направляющей 2 и инструмента 3 перед гидравлическим разжимом (а) и непосредственно после него (б)

### 1. Постановка задачи модернизации

Взаимное расположение гильзы и сваи перед гидравлическим разжимом и формированием РС показано на рис. 2. При этом гильза закреплена на опорном основании МСП, а свая погружена в грунт.

Для численного моделирования гидроразжима сваи использовался МКЭ. Задача решалась в плоской осесимметричной постановке. В КЭ модели,

показанной на рис. 3, использовались элементы второго порядка PLANE183.

Между сваем и гильзой были заданы контактные пары с трением (см. рис. 4), где коэффициент трения был принят равным 0,1 для пары сталь-сталь в воде. Размер задачи с учётом контактных элементов составил 9 064 узла, 3 666 элементов и 18 061 степень свободы.

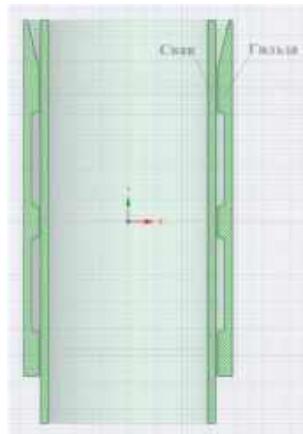


Рис. 2. Расположение гильзы и сваи перед гидравлическим разжимом



Рис. 3. Плоская осесимметричная КЭ модель «свая-гильза»



Рис. 4. Контактные пары «свая-гильза»

Нагружение конструкции происходило в три шага:

- на первом шаге к части внутренней поверхности сваи прикладывалось рабочее давление гидроразжима (см. рис. 5), которое было проварьировано в пределах от 55 до 90 МПа с шагом 5 МПа;
- на втором шаге выполнена разгрузка (рабочее давление было снято) и получено распределение остаточных напряжений и деформаций;
- на третьем шаге к торцу сваи прикладывалась осевая сила, вытягивающая сваю из гильзы (см. рис. 5), и строилась зависимость между этой силой и перемещением гильзы относительно сваи.

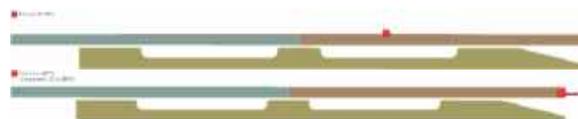


Рис. 5. Приложение рабочего давления гидроразжима к части внутренней поверхности сваи (сверху) и осевой силы к торцу сваи (снизу)

В качестве граничных условий для гильзы опорный торец на всех трёх шагах нагружения был закреплён от осевых перемещений, а для сваи середина промежуточного кольцевого выступа гильзы была закреплена от осевых перемещений только на первых двух шагах нагружения (см. рис. 6).

Учёт пластического деформирования РС выполнялся с помощью модели линейного

кинематического упрочнения, описываемой двумя параметрами: пределом текучести  $\sigma_y$  и касательным модулем (модулем упрочнения)  $E_T$ . Теоретическое обоснование модели и приемы практической реализации содержатся в работах [6-7]. Верификация модели на основе сопоставления расчетных данных с результатами экспериментов выполнялась в ряде работ, например, в статье [8]. Полезные результаты, полученные с использованием упомянутой модели, широко используются в практике проектирования судовых конструкций [9-11].



Рис. 6. Граничные условия закрепления от осевых перемещений торца гильзы и середины промежуточного кольцевого выступа сваи

Определение касательного модуля  $E_T$  выполнялось двумя методами. При традиционном подходе, сложившемся в практике инженерных расчетов, касательный модуль принимается равным 1/100 от модуля Юнга  $E$ :

$$E_T = \frac{E}{100} = \frac{206}{100} = 2,06 \text{ ГПа.} \quad (1)$$

В работе [2] предложен альтернативный подход к определению касательного модуля, заключающийся в его вычислении на основании истинных напряжений и деформаций:

$$E_T = \frac{\sigma_f - \sigma_y}{\epsilon_f - \frac{\sigma_y}{E}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_f$  – истинное сопротивление отрыву, которое может быть вычислено по формуле [3]

$$\sigma_f \approx \sigma_u (1 + 1,4\psi_c); \quad (3)$$

$\sigma_u$  – временное сопротивление;

$\psi_c$  – относительно сужение стандартного образца при разрыве, которое предлагается приблизительно вычислить по формуле

$$\psi_c \approx \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \ln(1 + \delta_c)}; \quad (4)$$

$\delta_c$  – относительное удлинение стандартного образца при разрыве;

$\epsilon_f$  – истинная деформация отрыва, которую для материалов с образованием шейки на стандартном образце предлагается оценить как

$$\epsilon_f \approx \delta_c + \frac{\sigma_f}{E}. \quad (5)$$

Свойства применяемых материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Модели и свойства материала**

	Свая	Гильза
Материал	Сталь S355 G8	Сталь S355 G8
Плотность $\rho$	7850 кг/м <sup>3</sup>	
Модель	Линейная упругая + линейное кинематическое упрочнение	
Модуль Юнга $E$	206 ГПа	
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,3	
Предел текучести $\sigma_y$	325 МПа	315 МПа
Временное сопротивление $\sigma_u$	570 МПа	530 МПа
Относительное удлинение $\delta_c$	21%	
Касательный модуль $E_T$ , ГПа	2,06 <sup>(1)</sup>   3,46 <sup>(2)</sup>	2,06 <sup>(1)</sup>   3,16 <sup>(2)</sup>

**2. Результаты расчетного исследования**

На рис. 7 показаны распределения накопленных пластических деформаций в РС после снятия давления гидроразжима при значениях модуля упрочнения сваи 2,06 и 3,46 ГПа. Как видно, для всех значений давления свая с большим модулем упрочнения имеет меньшие значения накопленных пластических деформаций.

Для сваи характерно появление двух типов кольцевых зон с максимальными пластическими деформациями. Две обширные зоны первого типа формируются в средней части промежутков между выступами гильзы. Две локальные зоны второго типа образуются в зонах контакта выступов гильзы со свайей.

В табл. 2 приведены результирующие расчётные пластические деформации в свае.

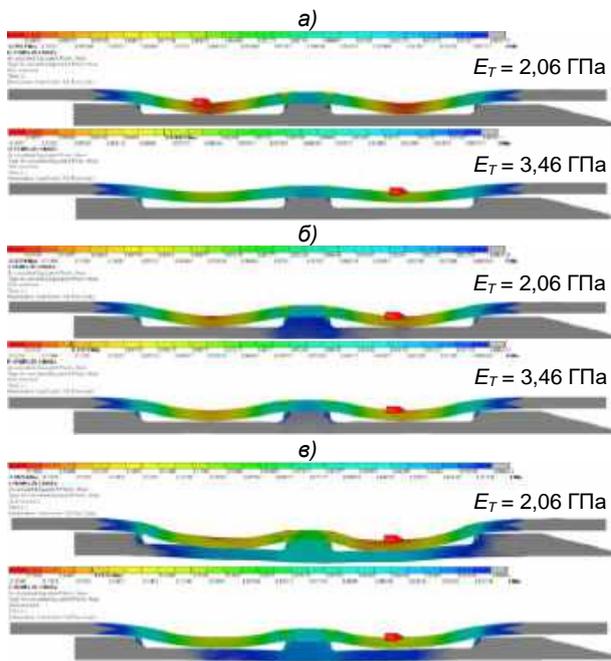


Рис. 7. Распределение накопленных пластических деформаций после снятия давления гидроразжима: а) 55 МПа; б) 70 МПа; в) 90 МПа

Таблица 2

**Максимальные расчётные пластические деформации в свае**

Зона пластического деформирования	Давление гидроразжима, МПа	$E_T$ , ГПа	
		2,06	3,46
Средние части промежутков между выступами гильзы	55	11,0%	7,5%
	90	18,3%	15,2%
Зоны контакта выступов гильзы со свайей	55	9,0%	5,0%
	90	17,5%	14,5%

На рис. 8 показаны диаграммы вытягивания сваи из гильзы при различных максимальных давлениях гидроразжима, а на рис. 9 – диаграмма зависимости усилия, при котором происходит достижение заданного нормативного уровня осевого перемещения сваи (составляющего величину, лежащую в диапазоне от 10 до 20 мм), от давления разжима. Как видно, при одинаковом давлении конструкция с большим модулем упрочнения имеет

меньшую жёсткость. При этом значение модуля упругости очень сильно влияет на оптимальное с точки зрения жёсткости РС давление: если для  $E_T = 2,06$  ГПа оно составляет 85 МПа, то для  $E_T = 3,46$  ГПа оптимальное давление гидроразжима составляет уже 60 МПа (см. рис. 10).

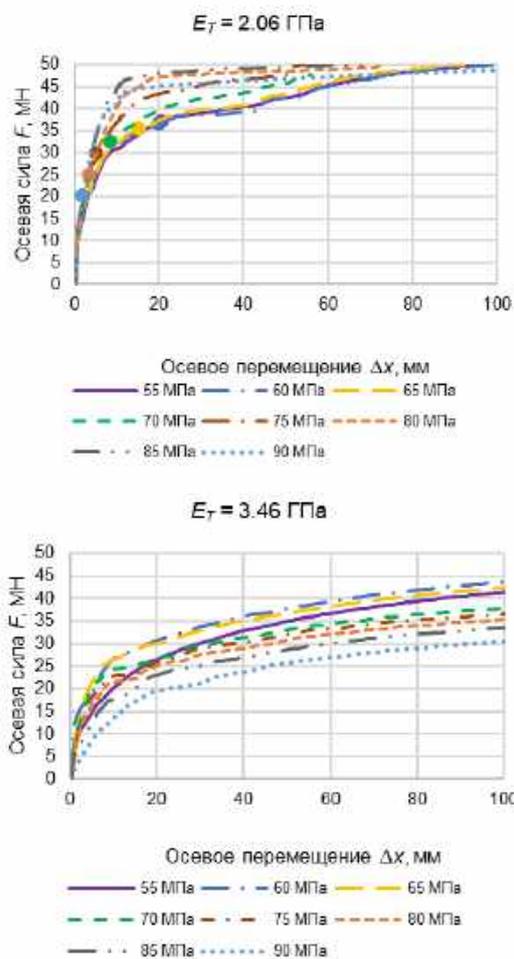


Рис. 8. Диаграммы вытягивания сваи из гильзы

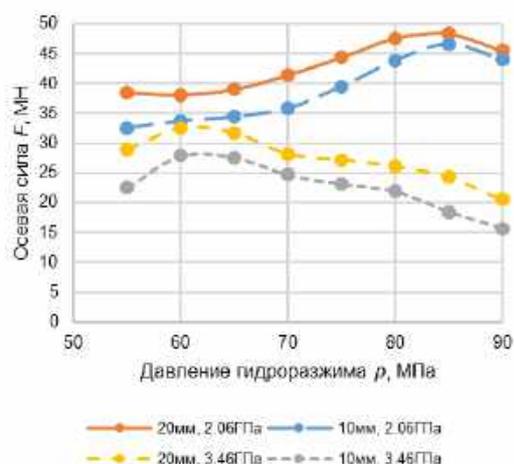


Рис. 9. Диаграмма достижения заданного уровня осевого перемещения сваи

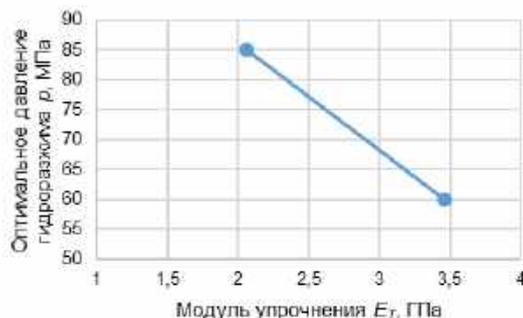


Рис. 10. Зависимость оптимального давления разжима сваи от её модуля упругости

В результате численного моделирования выявлены следующие недостатки РС, выполненного по технологии «Hydra-Lok»:

- большой уровень пластических деформаций сваи после её разжима, снижающий предельную и усталостную прочность оголовка сваи в эксплуатационных условиях, увеличивающий вероятность раннего появления трещин (даже в процессе монтажа) и снижающий эксплуатационную надежность «Hydra-Lok Swaged Connection Systems» (особенно при больших диаметрах свай); предварительное ударное нагружение сваи при её забивке снижает пластические свойства материала [4,5] и может способствовать появлению трещин при формировании РС в случае нерационального выбора марки стали;
- высокая чувствительность результатов моделирования процесса гидроразжима к особенностям диаграммы пластического деформирования материала сваи, свидетельствующая о зависимости оптимального давления при разжима от предела текучести и модуля упругости материала в состоянии поставки труб, а также в состоянии после их динамического (ударного) нагружения;
- малая эффективная площадь контактной поверхности РС при смещении сваи относительно гильзы в вертикальном направлении (например, при изгибе сваи в эксплуатационных условиях) и большой уровень контактных напряжений, способных вызвать усталостные трещины в оголовке сваи, в частности, повреждения от фреттинг-усталости при эксплуатации.

На рис. 11 показана диаграмма зависимости усилия, при котором происходит частичная потеря контакта сваи со средним выступом гильзы, от давления гидроразжима. Здесь, как и ранее, повышение модуля упругости приводит к более ранней потере контакта и снижению работоспособности РС. При этом, если для  $E_T = 2,06$  ГПа чем меньше давление гидроразжима, тем дольше сохраняется контакт, то для  $E_T = 3,46$  ГПа его оптимальное значение составляет 60 МПа, что согласуется с оптимальным значением давления по критерию жёсткости РС.

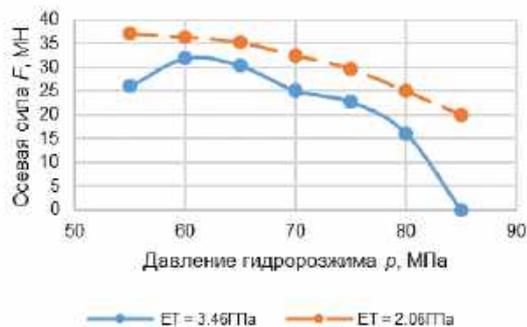


Рис. 11. Зависимость между осевой силой, соответствующей потере контакта сваи с промежуточным кольцевым выступом гильзы, и давлением разжима

### Выводы

Выполнено численное моделирование процесса гидроразжима сваи в гильзе при различных значениях рабочего давления в диапазоне от 55 до 90 МПа и двух различных значениях модуля упрочнения сваи (2,06 и 3,46 ГПа). Для каждой комбинации значений давления гидроразжима и модуля упрочнения получена диаграмма вытягивания сваи из гильзы. По полученным

диаграммам определены оптимальные с точки зрения жёсткости соединения сваи с гильзой значения давления разжима, а также выявлена высокая чувствительность результатов расчётов к значению модуля упрочнения, свидетельствующая об обратной зависимости оптимального давления от модуля упрочнения сваи. Последнее говорит о том, что оптимальное для одной партии стали давление гидроразжима может оказаться далеко не оптимальным для другой партии стали (даже с условием сохранения её марки) в силу того, что от партии к партии предел текучести и модуль упрочнения могут меняться в весьма широких диапазонах.

По результатам выполненных расчётов можно утверждать, что данная задача обладает высокой чувствительностью к значению модуля упрочнения. Предполагается, что это обусловлено значительным преобладанием работы пластических деформаций над работой упругих деформаций, поэтому при сохранении величины работы небольшая вариация в модуле упрочнения приводит к существенным изменениям в значениях пластических деформаций. Последние же определяют конечную деформированную геометрию конструкции, которая сильно влияет на несущую способность РС сваи и гильзы.

### Литература

- Hydra-Lok Swaged Connection Systems // YouTube [сайт]. URL: <https://youtu.be/FMRe5-Wozz4> (дата обращения: 24.04.2022).
- Филатов А.Р. Метод проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы (дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н.). СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2020. 184 с.
- Махутов Н.А. Деформационные критерии и расчёт элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
- Meshcheryakov Y.I. et al. Dynamic structures in shock-loaded copper. *Physical Review B*. 2008; 78(6).
- Барахтин Б.К., Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. Динамические и фрактальные свойства стали СП-28 в условиях высокоскоростного нагружения. *Журнал технической физики*. 1998. Т. 68, № 10. С. 43-49.
- Handbook of Materials Behavior Models, Volumes 1-3. Jean LeMaitre, 2001. 393 с.
- Ansys Mechanical APDL Theory Reference. 2021. 952 с.
- Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Численное моделирование процессов упругопластического деформирования перекрытия ледового пояса морской ледостойкой платформы. *Труды Крыловского государственного научного центра*, 2015, выпуск 86 (370). С. 125-132.
- Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Оптимизация алюминиевой крышки люкового закрытия сухогрузного судна. – *Морские интеллектуальные технологии*. № 1 том 3. С. 58-65.
- Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С., Филатов А.Р. Принципы и современные методы оптимального проектирования крупногабаритных судовых перекрытий. *Труды Крыловского государственного научного центра*, 2020, специальный выпуск 2. С. 83-88.
- Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Конструктивное оформление узлов судовых конструкций с использованием программ топологической и параметрической оптимизации. *Труды Крыловского государственного научного центра*, специальный выпуск 1, 2020. С. 67-72.

### References

- Hydra-Lok Swaged Connection Systems // YouTube. URL: <https://youtu.be/FMRe5-Wozz4> (date of the application: 24.04.2022).
- Filatov A.R. Method for designing ship structures using an integrated approach to topology, size and shape optimization (PhD thesis). St. Petersburg: Krylov state research centre, 2020. 184 p. (in Russian).
- Makhutov N.A. Deformation criteria and structural elements strength calculation. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. 272 p.
- Meshcheryakov Y.I. et al. Dynamic structures in shock-loaded copper. *Physical Review B*. 2008; 78(6).
- Barakhtin B.K., Meshcheryakov Yu.I., Savenkov G.G. Dynamic and fractal properties of SP-28 steel under high-speed loading conditions. *Technical Physics*. 1998. Vol. 68, no. 10. P. 43-49.
- Handbook of Materials Behavior Models, Volumes 1-3. Jean LeMaitre, 2001. 393 p.
- Ansys Mechanical APDL Theory Reference. 2021. 952 p.

8. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Numerical simulation of the processes of elastic-plastic deformation of the overlap of the ice belt of the sea ice-resistant platform. Transactions of the Krylov State Research Center, 2015. Vol. 86, no. 370. P. 125-132 (in Russian).
9. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Bulk carrier aluminum hatch cover optimization. Marine intellectual technologies, 2020/№ 1 part 3, P. 58-65 (in Russian).
10. Kryzhevich G.B., Norkov E.S., Filatov A.R. Principles and of optimal design methods for large ship grillages. Transactions of the Krylov State Research Center, 2020, special issue 2. P. 83-88 (in Russian).
11. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Design of ship structural assemblies using topological and parametric optimization. Transactions of the Krylov State Research Center, 2020, special issue 1. P. 67-72 (in Russian).

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

**Геннадий Брониславович Крыжевич**, доктор технических наук, профессор, начальник сектора, Крыловский государственный научный центр, 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44; профессор кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3; e-mail: g\_kryzhevich@ksrc.ru

**Gennadiy B. Kryzhevich**, Dr.Sci. (Eng), Professor, head of sector, Krylov State Research Centre, 44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation; Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmaskaya, 3, St. Petersburg, 1960121, Russian Federation; e-mail: g\_kryzhevich@ksrc.ru

**Антон Романович Филатов**, кандидат технических наук, научный сотрудник, Крыловский государственный научный центр, 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44; ассистент кафедры высшей математики, Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, 190005, Россия, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1; e-mail: filatov\_ar@voenmeh.ru

**Anton R. Filatov**, Ph.D. (Eng), researcher, Krylov State Research Centre, 44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation; Assistant lecturer of the Department of Higher Mathematics, Baltic State Technical University "Voenmekh", Krasnoarmeyskaya street, 1, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: filatov\_ar@voenmeh.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.06.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 28.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 08.08.2022.

Научная статья

УДК 004.942:004.031.043

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.045>

## Цифровые модели нестационарной динамики подводных объектов в среде «облачных» вычислений

Ю.И. Нечаев<sup>1</sup> Nechaev@mail.ifmo.ru, Д.В. Никущенко<sup>1</sup> Research@smtu.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** Рассматриваются концептуальные основы и процедуры построения цифровой модели «облачной» среды эволюционной динамики подводных объектов (ПО) на основе многофункционального программного комплекса (МПК) [1] – [9]. Разработанная стратегия позволяет реализовать процедуры цифрового моделирования в «облачной» среде экстренных вычислений (Urgent Computing – UC. Используемый абстрактный образ цифровой модели отражает основные тенденции развития управленческих решений при разработке практических приложений нестационарной динамики ПО. Подход к интерпретации цифрового моделирования основан на эффективном использовании достижений в области интеллектуальных технологий. Вычислительная среда цифрового моделирования представлена как *активная динамическая система* на основе нечеткой формальной системы (НФС) управления, обеспечивающей функционирование цифровой модели «облачной» среды при непрерывном изменении динамики ПО и внешних возмущений в условиях неопределенности. Приведены направления реализации цифровой модели в процессе выработки управленческих решений при проектировании, постройке и эксплуатации ПО новых поколений.

**Ключевые слова:** цифровая модель, облачная среда, нестационарная динамика, современная теория катастроф, многофункциональный программный комплекс, экстренные вычисления.

**Финансирование.** Настоящее исследование выполнено в рамках государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ № 075–03-2022-221 от 12.01.2022.

**Для цитирования:** Нечаев Ю.И., Никущенко Д.В. Цифровые модели нестационарной динамики подводных объектов в среде «облачных» вычислений. 2022. № 3 часть 1, С. 346—352.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.045>

## Digital models of unsteady dynamics of underwater vehicle in the cloud computing environment

Yuri I. Nechaev<sup>1</sup> Nechaev@mail.ifmo.ru, Dmitry V. Nikuschenko<sup>1</sup> Research@smtu.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The conceptual foundations and procedures for constructing a digital model of the "cloud" environment of the evolutionary dynamics of underwater vehicle (UV) based on a multifunctional software package (MPC) are considered [1] - [9]. The developed strategy makes it possible to implement digital modeling procedures in the "cloud" environment of emergency computing (Urgent Computing - UC. The abstract image of the digital model used reflects the main trends in the development of management decisions in the development of practical applications of non-stationary program dynamics. The approach to the interpretation of digital modeling is based on the effective use of achievements in the field of intelligent technologies. The computational environment of digital modeling is presented as an active dynamic system based on a fuzzy formal control system (NFS), which ensures the functioning of a digital model of a "cloud" environment with continuous changes in the dynamics of software and external disturbances under conditions of uncertainty. The directions of implementation of the digital model in the process of managerial decision-making in the design, construction, and operation of software of new generations are given.

**Keywords:** digital model, cloud environment, non-stationary dynamics, modern catastrophe theory, multifunctional software package, urgent computing.

**Financial Support:** This study was carried out within the framework of the state assignment for the implementation of research works No. 075-03-2022-221 dated 12.01.2022.

**For citation:** Yuri I. Nechaev, Dmitry V. Nikuschenko. Digital models of unsteady dynamics of underwater vehicle in the cloud computing environment. 2022. № 3 part 1. P. 346—352.

### Введение

Рассмотрим концептуальные основы построения технологической платформы цифровой модели «облачной» среды, в которой данные в цифровой форме являются ключевым фактором, определяющим иерархическую структуру управленческих решений в виде совокупности функциональных элементов, образующих

интерпретирующую систему и связи между ними (рис.1). Изменяя связи, можно получать при сохранении элементов другую систему в соответствии с рассматриваемым приложением, обладающую новыми свойствами, или реализующими другой закон функционирования. Функциональные элементы цифровой модели описывают совокупность выполняемых системой функций, характеризует морфологию системы (ее построение) – состав подсистем и их взаимосвязи, а

информационные элементы цифровой модели – отношения между элементами в виде структур данных (состав и взаимосвязи). Поведенческий модуль цифровой модели описывает информационные процессы (динамику функционирования), определяемые следующими компонентами:



Рис. 1. Стратегия построения цифровой модели «облачной» среды при генерации управленческих решений

состояние системы, ситуацию, переход из одного состояния в другое, условия перехода, последовательность состояний на интервале реализации.

Таким образом, цифровая модели – это набор современных подходов, вычислительных средств и интегрированных технологий, объединенных общим решением. Цифровая модель определяет совокупность интеллектуальных модулей, формирующих интерпретацию абстрактного образа (АО) приложения интеллектуальных технологий и способов формирования управленческих решений [3] – [5] в «облачной» среде [8] на основе нечеткой формальной системы (НФС) [2]. Интерпретация цифровой модели потребовала перестройки разработанных моделей управления в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [8]. Ниже рассмотрены теоретические аспекты разработки цифровой модели в системах интеллектуальной поддержки (ИП) управленческих решений на примере мультиагентного моделирования [5] как наиболее общего подхода к формализации управленческих решений в среде коллективного интеллекта.

#### Механизмы функционирования цифровой модели «облачной» среды

Открытая среда, формирующая механизмы функционирования цифровой модели исследуемого приложения «сквозных» интеллектуальных технологий, рассматривается как активная динамическая система (АДС) [6], а смена состояний в процессе эволюции происходит за счет появления новых знаний о среде взаимодействия и способах

управления, которые изменяют прежние закономерности поведения цифровой модели, верные для ранее фиксированного состояния. В трансформируемых средах смена состояний функционирования цифровой модели планируется и инициируется в зависимости от особенностей эволюционной динамики АО исследуемой ситуации.

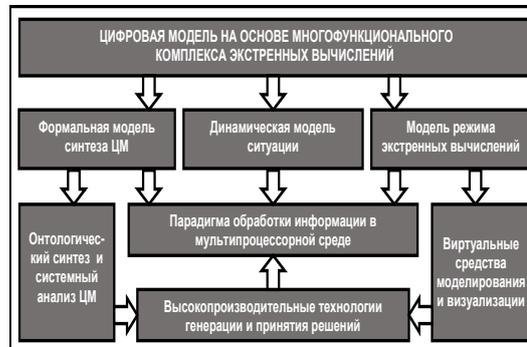


Рис. 2. Интеграция ЦМ в динамической среде УС

Процесс функционирования цифровой модели в рамках рассмотренного подхода – это последовательная смена состояний эволюционной динамики. Совокупность всех возможных состояний {S} абстрактного образа АО определяет пространство состояний цифровой модели. Эффективность процесса контроля на основе цифровой модели – степень приспособленности многофункционального программного комплекса (МПК) к достижению цели интерпретации. Критерий эффективности цифровой модели – обобщенный показатель и правило выбора лучшего решения [4]:

$$Y^*(NM) = \max\{Y^j(NM)\}. \quad (1)$$

В ЦМ вводится оператор  $F^S$ , обеспечивающий преобразование

$$y(t) = F^S(x(t), u(t), w(t) h(t)), \quad (2)$$

а метод получения выходных характеристик ЦМ кроме определяющих параметров входа  $x(t)$ , управляющих воздействий  $u(t)$  и внешней среды  $w(t)$ , учитывает и собственные характеристики  $h(t)$  среды взаимодействия. Состояние цифровой модели – это множество значений характеристик в данный момент времени.

Формально состояние цифровой модели в момент времени  $t_0$  полностью определяется начальным состоянием  $S(t_0)$ , входным воздействием  $x(t)$ , управляющим воздействием  $u(t)$ , внутренними характеристиками  $h(t)$  и воздействиями внешней среды  $w(t)$  за промежуток времени  $[t_0, t]$  с помощью представления:

$$S(t) = f(S(t_0), x(\tau), u(\tau), w(\tau), h(\tau)), \tau \in [t_0, t]; \quad (3)$$

$$y(t) = g(S(t), t), \quad (4)$$

Уравнение состояния для начальной конфигурации  $S(t_0)$  и переменным  $x, u, w, h$  определяет вектор-функцию  $S(t)$ , а уравнение наблюдения – по полученному значению состояний  $S(t)$  – переменные на выходе системы  $y(t)$ . Таким образом, цепочка уравнений объекта «вход – состояния – выход» позволяет определить характеристики:

$$y(t) = f[(g(S(t_0), x(t), u(t), w(t), h(t))), (5)$$

а под цифровой моделью следует понимать конечное подмножество переменных  $\{x(t), u(t), w(t), h(t)\}$  совместно со связями между ними и выходными характеристиками  $y(t)$ .

**Интерпретация функционирования цифровой модели «облачной» среды**

Описание ЦМ в динамической среде АО исследуемой ситуации реализуется в виде теории интерпретации сложных динамических систем. Построение научной теории цифровой модели определяется исходными аксиомами рассматриваемой предметной области. Все остальные положения теории получаются как логические следствия аксиом. В основе аксиоматической теории цифровой модели лежит метод интерпретаций [4]. Каждому понятию и отношению аксиоматической теории соответствует некоторый математический объект цифровой модели, совокупность которых называется *полем интерпретации*:

$$P(Int) = \langle Q(ID)_1, \dots, Q(ID)_m \rangle, (6)$$

где  $\langle Q(MD)_1, \dots, Q(MD)_m \rangle$  – математические описания, определяющие структуру функциональных моделей АО динамической ситуации.

Всякому утверждению аксиоматической теории ставится в соответствие некоторое высказывание об элементах *поля интерпретации*, которое может быть истинно или ложно в данной ситуации. Поле интерпретации и его свойства являются предметом рассмотрения базовой теории – современной теории катастроф (СТК). Уточнением аксиоматической теории цифровой модели является понятие *формальной системы*. Это позволяет представить аксиоматическую теорию формальной системы FS(M) как математические объекты и строить общую теорию цифровой модели как *метатеорию* таких интерпретаций.

$$FS(M) = \langle Meta\{(PR)_1, \dots, (PR)_n\} \rangle, (7)$$

где  $\{(PR)_1, \dots, (PR)_n\}$  – совокупность теоретических принципов, определяющих функционирование АО цифровой модели.

Аксиоматическая теория цифровой модели предусматривает построение классов формул, обеспечивающих генерацию альтернатив и выбор решения. Структура формул реализует стратегию управления поведением объектов интерпретации в условиях неопределенности. Подход к генерации альтернатив в задаче построения технологической платформы цифровой модели реализован на основе следующей аксиомы.

**Аксиома.** При выполнении условий нерегулярности и управления с геометрическими и функциональными ограничениями технологическая платформа цифровой модели в условиях неопределенности реализуется на основе построения решений, порождаемых элементами АО ситуации, минимизирующими функцию интерпретации пространства поведения на заданном этапе эволюции системы.

Применение этой аксиомы при построении динамической среды цифровой модели осуществляется путем генерации решений в рамках

концепции УС [8]. Пусть начальное состояние цифровой модели неизвестно заранее и задано ограничение на допустимые значения определяющего параметра  $x^0 \in X^0$ . Тогда в каждый момент времени известно множество

$$X(t, u(\bullet)) = X(t, u(\bullet), X^0) = U\{x(t), u(\bullet), x^0 \mid x^0 \in X^0\}, (8)$$

объединяющее все элементы технологической платформы цифровой модели при известном управлении  $u=u(t)$  и всевозможных векторах  $x^0 \in X^0$ .

Таким образом, имеем ансамбль реализаций цифровой модели интерпретируемой среды

$$X(t, u(\bullet)), t_0 \leq t \leq t_k, (9)$$

порожденных множеством  $X^0$  и управлением  $u(\bullet)$  при заданном возмущении  $w(t)$ . Выбирая функцию  $u(t)$ , можно управлять множеством цифровых моделей в пространстве альтернативных решений.

При исследовании проблемы адаптируемости цифровой модели вводятся в рассмотрение фактор, приводящий к смещению системы из области одного аттрактора в область другого. Таким фактором являются изменения в динамике системы, обусловленные вектором параметров  $J(a)$ . Мера адаптируемости цифровой модели рассматривается путем анализа величины и направления такого изменения вектора  $J(a)$ , которое необходимо, чтобы перевести вектор  $J(a)$  через особенность катастрофы  $\psi(Cat)$  [4].

Рассмотрим интерпретацию цифровой модели на основе расширения функциональных возможностей подхода [7] за счет использования аналитической компоненты динамической модели СТК [3]. Метод интерпретации ситуации в цифровой модели представляется сетевой структурой, показанной на рис.3.

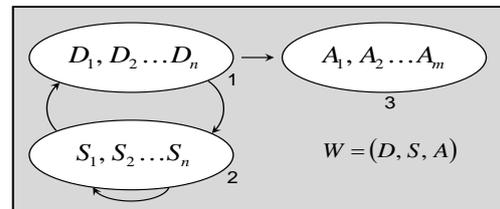


Рис.3. Сетевая интерпретация структуры «диагнозы – симптомы – альтернативы»

Суперматрица сети в данной интерпретации отображает расширенную структуру:

$$W = (D, S, A) = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_1 W_{12} & 0 \\ \beta_1 W_{21} & \alpha_2 W_{22} & 0 \\ \beta_2 W_{31} & 0 & 1 \end{bmatrix}, (10)$$

при использовании которой вводится в рассмотрение матрица

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_1 W_{12} \\ W_{21} & \alpha_2 W_{22} \end{bmatrix}, (11)$$

с помощью которой оцениваются предельные приоритеты ненулевых элементов исследуемой сети. В устойчивом состоянии сети имеем  $[W_{31}, 0] Qm$ . Приоритеты альтернатив совпадают с результатами, полученными для иерархии на рис.3

потому, что  $W_{31}=w(A|D)$  и все столбцы матрицы идентичны вектору  $[w_1, w_2]$  [7].

**Цифровая модель «облачной» среды на основе мультиагентной системы**

Интерпретации цифровой модели на основе [5] позволяет представить эволюционирующую MMS в виде области взаимодействия интеллектуальных агентов (ИА) в среде коллективного интеллекта (рис.4). Конфигурация ИА отображает согласованное поведение ИА; изменения в функционировании среды MMS в рамках концепции динамики эволюционирующей системы; результат функционирования MMS в условиях адаптации и самоорганизации при непрерывном изменении динамики среды взаимодействия.



Рис. 4. Парадигма высокопроизводительных вычислений при формировании ЦМ

Виртуальные средства MMS при интерпретации цифровой модели разрабатываются в зависимости от особенностей контроля АО ситуации в виде кортежа [5]:

$$\langle \Phi(FC), X, Y \rangle, \quad (12)$$

где  $\Phi(FC)$  – функция нечеткого соответствия, определяющая среду MMS в пространствах поведения и управления динамической модели СТК;  $X$  – область входных воздействий,  $Y$  – область выхода системы, причем декартово произведение

$$X \times Y \subseteq M(FC) \quad (13)$$

определяет множество, задающее область определения нечеткого соответствия.

Ассоциация ИА, образующих среду MMS, представлена в виде следующего описания:

$$MMS = \langle N(S), Ag, E, P(S) \rangle, \quad (14)$$

где  $N(S)$  – наименование интерпретирующей системы;  $Ag \in Ag(S)$  – набор всех конфигураций ИА в среде MMS;  $E \in E_S$  – совокупность жизненных пространств MMS;  $P(S)$  – общесистемные характеристики среды MMS.

Стратегия поведения среды MMS в цифровой модели представляет собой множество взаимозависимых функций, пересечение которых представляет собой процесс принятия решений ансамблем ИА.

**Стратегия и тактика эксперимента на основе цифровой модели «облачной» среды**

Концепция цифровой модели определяет эффективные механизмы уменьшения сложности описания модели ИА в среде MMS. При этом в поведении ИА выделяется система взаимосвязанных функциональных моделей (ФМ), представляющих собой совокупность параметров ИА, определяющих специфику реализации модели поведения. ФМ ИА

формируется как взвешенная композиция базовых моделей.

Компактность описания ФМ позволяет упростить согласование и утверждение моделей поведения ИА, включаемых в ФМ, что, повышает прогностические свойства технологии SMM.

Группа взаимодействующих ИА в цифровой модели описывается с помощью пространства состояний и действий, а также стратегией поведения в условиях адаптации и самоорганизации:

- $A = A_1, \dots, A_n$  – пространство действий, где  $A_j = A_j(s_j)$ ,  $A_j \subseteq A_i$ . Текущее действие ИА  $a_j \in A_j$  является частью объединенного действия  $a = [a_1, \dots, a_n]$  MMS;
- пространство состояний в ЦМК – множества переменных состояния  $S = \{S_1, \dots, S_n\}$ , где  $S$  определяет состояние ИА  $s_j$  в MMS с учетом его переменной состояния  $S_j$ ;
- глобальная стратегия поведения  $a_i = \pi(s_i)$  в ЦМ определяет объединенное действие ИА по текущему состоянию среды MMS.

Целью обучения группы ИА является формирование оптимальной эволюционной стратегии  $\pi^*$ , минимизирующей глобальную функцию ценности  $Q^*(s,a)$ . В задачах кооперации ИА учитывают только релевантные состояния и действия других агентов, что позволяет уменьшить пространство поиска состояний MMS при интерпретации динамических ситуаций. Знания о релевантных влияниях ИА друг на друга, максимизирующие функцию  $Q^*(s,a)$ , определяет стратегию координации.

На основе цифровой модели в среде MMS можно инициализировать процессы самоорганизации путем замены реальной ситуации на искусственную среду, характеристики которой определяют АО ситуации.

**Планирование и анализ динамических ситуаций на основе цифровой модели «облачной» среды**

В качестве аппарата планирования и анализа динамических ситуаций в цифровой модели используется матрица стратегических решений, представленная в виде трехуровневой иерархии [4]:

$$W = (G, C, A) = [W_A, W_B], \quad (15)$$

где  $G$  – цели MMS;  $C$  – критерии оценки ситуации;  $A$  – альтернативы, соответствующие концепции различных схем взаимодействия ИА в среде MMS;  $W_A$  – вектор, который представляет воздействие цели  $G$  на критерии  $C$ ;  $W_B$  – матрица, содержащая приоритеты воздействия критериев на каждую из альтернатив.

Процесс развития эволюционной динамики цифровой модели с учетом возможности возникновения новых ситуаций вследствие рекомбинации и преодоления пороговых значений в заданной ситуации описывают с помощью следующих рекуррентных соотношений:

$$x_{i0}^{t+1} = f_i(y_{t+1}); \quad (16)$$

$$x_{ij}^{t+1} = \alpha_{i,j-1}^t x_{i,j-1}^t \quad (j \neq 0); \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_{i,j}^{t+1} x_{i,j}^{t+1}. \quad (18)$$

Здесь  $\alpha_{ij}^t \geq 0$  и  $\beta_{ij}^t \geq 0$  – коэффициенты взаимодействия  $i$  в ситуации  $j$  в период  $t$ ;  $y^t$  – суммарная оценка ситуации вследствие использования управляющих воздействий, повышающих устойчивость системы взаимодействия;  $f_i(y_i)$  – зависимость числа ситуаций от управляющих воздействий.

На основе соотношений (1) – (18) реализованы различные интерпретации ЦМ в практических приложениях ПО новых поколений и морской техники (рис.5)

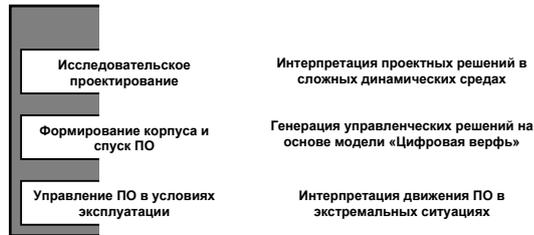


Рис. 5. ЦМ в приложениях нестационарной динамики ПО

**Практические приложения цифрового моделирования**

**Пример 1.** Рассмотрим эффективные механизмы уменьшения сложности описания модели ИА в среде MMS. В поведении ИА выделяется система взаимосвязанных ролевых моделей в виде совокупности параметров ИА, определяющих специфику реализации модели поведения. Ролевая модель отдельной ИА формируется как взвешенная композиция базовых ролевых моделей. В качестве примера на рис.6 рассмотрена абстрактная ролевая модель поведения (10 параметров и 8 ролей) [1],[8].

Параметр	Роль 1	Роль 2	Роль 3	Роль 4	Роль 5	Роль 6	Роль 7	Роль 8	Текущая
A1	3	8	9	4	10	6	9	0	6,41
A2	7	0	7	10	9	10	9	0	7,89
A3	10	4	10	9	6	6	5	10	9,07
A4	1	2	2	1	5	9	10	7	2,40
A5	10	2	7	5	4	7	3	1	6,72
A6	6	6	9	9	8	10	8	5	8,30
A7	9	7	4	0	4	1	7	1	4,08
A8	9	5	2	10	1	1	4	0	5,44
A9	8	6	6	10	3	10	7	10	7,55
A10	9	2	9	0	0	4	0	8	5,70
Вес	100	10	200	121	15	25	24	1	

Рис. 5. Абстрактная ролевая модель в системе ЦМ

В зависимости от внешних и внутренних факторов ИА вес определенных ролей может увеличиваться или уменьшаться. Компактность описания и интуитивность восприятия ролевого подхода позволяет упростить согласование и утверждение моделей поведения отдельных типов ИА, включаемых в модель, что, повышает исследовательские и прогностические свойства технологии SMM.

Группа взаимодействующих ИА в ЦМ описывается с помощью пространства состояний и действий, а также стратегией поведения в условиях адаптации и самоорганизации:

- $A = A_1, \dots, A_n$  – пространство действий, где  $A_j = A_j(s_j)$ ,  $A_j \subseteq A_i$ . Текущее действие ИА  $a_i \in A_j$  является частью объединенного действия  $a = [a_1, \dots, a_n]$  MMS;
- пространство состояний в ЦМ MMS – множества переменных состояния  $S = \{S_1, \dots, S_n\}$ , где  $S$

определяет состояние агента  $s_j$  с учетом его переменной  $S_j$ ;

- глобальная стратегия поведения  $a_i = \pi(s_i)$  в ЦМ определяет объединенное действие по текущему состоянию MMS.

Целью обучения группы ИА является формирование оптимальной эволюционной стратегии  $\pi^*$ , минимизирующей глобальную функцию ценности  $Q^*(s,a)$ . В задачах кооперации ИА учитывают только релевантные состояния и действия других агентов, что позволяет уменьшить пространство поиска состояний MMS при интерпретации ситуаций.

Знания о релевантных влияниях ИА друг на друга, максимизирующие функцию  $Q^*(s,a)$ , определяет стратегию координации. На основе ЦМ в среде MMS можно инициализировать процессы самоорганизации в системе ИП с использованием интеллектуальных технологий [5]. Формализация поведения ИА в виртуальной среде MMS осуществляется путем замены реальной ситуации на искусственную среду, характеристики которой определяют АО конфликтной ситуации.

**Пример 2.** Рассмотрим реализацию функциональных компонент модели «Цифровая вервь» при выборе построечного места ПО. Предлагаемый алгоритм выбора использует принцип нормального функционирования на основе динамической модели СТК [3]. Выразим принцип нормального функционирования в терминах модели «Цифровая вервь» и представим перемещение строящегося ПО на построечном месте в заданные моменты времени  $t_1, \dots, t_n$ . Эти моменты определяют характерные точки изменения этапов сборки и спуска ПО в виртуальной среде, отображающей последовательность операций  $Str_1, \dots, Str_n$  в виде следующих классов состояния:

- класс  $N$ , определяющий характеристики строящегося ПО;
- класс  $D$ , учитывающий условия завода-строителя;
- класс  $S$ , определяющий безопасность ПО при спуске.

Введем в рассмотрение множества  $Q_k$  ( $k=1,2,3$ ), образованные символами  $N, D, S$

$$Q_1 = \{N\}, Q_2 = \{N, D\}, Q_3 = \{N, D, S\}. \quad (19)$$

Формальная модель (N,D,S)-динамики постройки и спуска РЛ представляется структурой:

$$Str(X, t) = \{N, D, S\}_{J,k} \quad (20)$$

$$(J = 0,1,2, \dots, N), k = \{1,2,3\}$$

При  $k=1$  система (20) описывает N-условия, при  $k=2$  N и D условия и при  $k=3$  NDS условия.

Обозначим  $X(k,t)$  вектор, определяющий перемещение ПО в процессе постройки в текущий момент времени, и запишем условие реализуемости  $N(D(S))$  в виде:

$$\|F(k)\| = \max X(k, t), (t = 0,1,2, \dots). \quad (21)$$

При построении системы цифрового моделирования для  $k=1,2,3$  на построечном месте справедливы неравенства:

$$\tilde{O}_{j \max}^t \geq \tilde{O}_{jk}^t \geq \tilde{O}_{jk}^{t+1}, \quad (22)$$

$$(j = 1, \dots, m; k = 1,2,3; t = 0,1,2, \dots)$$

где  $X_j \max$  – вектор, характеризующий предельно допустимые значения определяющих параметров в  $j$ -м состоянии.

В выражении (22) кортеж  $\langle N, D, S \rangle$  описывает эволюцию строящегося ПО в текущий момент времени. Из условия реализуемости  $(N, D, S)$  можно записать условие:

$$Str(X, t) \rightarrow \Omega(Stab), t \in [t_1, t_k], \quad (23)$$

где символ импликации означает, что судно сохраняет безопасность при спуске на воду  $\Omega(Stab)$ , определяющему стабильное состояние системы.

Нарушение условий нормальной постройки и спуска ПО  $D(X)$  и структуры  $D(Fr)$  системы взаимодействия выражается условиями

$$D(X) \in \Omega(1); \quad (24)$$

$$D(Fr) \in \Omega(2); \quad (25)$$

а нарушение критериального базиса  $S(C_R)$  – условием потери устойчивости при выполнении операции спуска ПО

$$S(C_R) \rightarrow \Omega(Cap), \quad (26)$$

где области  $\Omega(1)$  и  $\Omega(2)$  описывают динамические процессы строящегося ПО, а область  $\Omega(Cap)$  – потерю устойчивости системы.

## Заключение

Моделирование АО эволюционной динамики цифровой модели подводного объекта реализуется на основе современных интеллектуальных технологий. Интерпретирующий модуль МПК обеспечивает выполнение процедур ИП на основе НФС. Преобразование информации при построении АО технологических ситуаций цифровой модели реализованы в пространствах поведения и управления СТК. Основными «сквозными» технологиями при построении цифровой модели функции управления являются нейродинамические системы [2] и мультиагентное моделирование [5]. Концептуальный базис среды взаимодействия разработан применительно к MMS – интегрированной модели ассоциации ИА, которые обладают функцией погружения в виде набора множества состояний среды и множества действий ИА, определяемых стратегией самоорганизации. Функция погружения содержит алгебру поведения ИА в виде функциональных модулей МПК. Концепция MMS допускает возможность использования многоуровневых сред взаимодействия, обеспечивающих эквивалентные преобразования данных

## Литература

1. Воронин А.А., Мишин С.П. Оптимальные иерархические структуры. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 214 с.
2. Нейрокомпьютеры в интеллектуальных технологиях XXI века. — М.: Радиотехника, 2011. – 352 с.
3. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. – 392 с.
4. Нечаев Ю.И. Современные проблемы информатики и вычислительной техники. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2018. – 384 с.
5. Нечаев Ю.И. Проблемы мультиагентного моделирования на основе нейродинамических систем и современной теории катастроф // XX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2018». Лекции по нейроинформатике. М.: НИЯУ МИФИ. 2018, с.157 – 199.
6. Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. – М.: СИНТЕГ, 1999. – 104 с.
7. Осипов В.П., Четверушкин Б.Н., Балута В.И., Нечаев Ю.И. Формальный аппарат моделирования и интерпретации антагонистических конфликтов на базе электронного полигона. – Труды ИПМ РАН им. М.В.Келдыша. №179. М.: 2018. – 27 с.
8. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. – М.: ЛКИ. 2008. – 360 с.
9. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared // Preprint arXiv:0901.0131, 2008 [Электронный ресурс]: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.0131.pdf>.
10. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. [Электронный ресурс]: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.

## References

1. Voronin A.A., Myshin S.P. Optimalnye ierarchicheskie struktury [Optimal Hierarchies structures]. – М.: IPU RAN, 2003. – 214 p.
2. Neirokomputery v ontellectualnykh technologiych XXI veka [Neurocomputers in intelligence technology XXI century]. — М.: Radiotekhnika, 2011. – 352 p.
3. Nechaev Yu.I. Teoria katastrof: sovremenny podvhpod pri prinatii resheny [Catastrophe theory: modern approach for decision making]. – St.-Petersburg: Art-Xpress, 2011.– 392 p.
4. Nechaev Yu.I. Sovremenny problemy informatiki I vychaslitelnoy tehniki [Modern problems of the infotmatic and computertechncis]. – St.-Petersnurg: Art-Xpress. 2018. – 384 p.
5. Nechaev Yu.I. Problemy multiagenynogo mpdelirivaniya na osnove neirodonamicheskich system I covremennoi teorii catastrif [multi-agent modeling problems on the base neural-dynamic systems and modern of catastrophe theory] // XX International science-technic conference «Neural infoformatic-2018». Lecture on neural informatics. М.: NIJAU MIFI. 2018, p.157 – 199.
6. Novikov D.A., Petrakov S.N. Kurs teorii activnych sistem [Course of theory of the active system]. – М.: SINEG, 1999. – 104 c.
7. Osipov V.P., Cetverushkin B.N., Baluta V.I., Nrchaev Yu.I. Formalnyi apparet modelirovania I interpretatii antagonistichekich konfliktov na base virtualnogo poligona [Formal apparatus of modeling and interpretation antagonistic conflicts on the base of virtual testbed] Формальный аппарат моделирования и интерпретации антагонистических конфликтов на базе электронного полигона. – Труды ИПМ РАН им. М.В.Келдыша. №179. М.: 2018. – 27 с.

8. Saaty T. Prinyatie reshey for zavisimostyach I obratbych svasyachy [Decision marking for determine and back connection. – M.: LKI. 2008. – 360 p.
9. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared // Preprint arXiv:0901.0131, 2008 [Электронный ресурс]: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.0131.pdf>.
10. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. [Электронный ресурс]: <<http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>>.

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

**Юрий Иванович Нечаев**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: [nechaev@mail.ifmo.ru](mailto:nechaev@mail.ifmo.ru)

**Yuri I. Nechaev**, Dr. Sci. (Eng), professor, professor of the Department of computer science, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [nechaev@mail.ifmo.ru](mailto:nechaev@mail.ifmo.ru)

**Дмитрий Владимирович Никущенко**, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: [Research@smtu.ru](mailto:Research@smtu.ru)

**Dmitry V. Nikuschenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, vice-rector for research, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [Research@smtu.ru](mailto:Research@smtu.ru)

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.05.2022

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.07.2022

Принята к публикации/accepted for publication 16.08.2022



## Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173  
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3  
e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

### ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru) (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

**Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».**

На страницах журнала публикуются **НОВЫЕ** научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставляемому по запросу счету.**

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала  
"МОРСКИЕ 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**