

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101 ISSN 2073-7173 (print)

1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010 ISSN 2588-0233 (on line)

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

00101001011001100100110010011101100111000100110010010101000011100110010011100010110100100100

001101010011010010000101101001010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101

110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010

00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010011001

11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100

001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



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



THOMSON REUTERS  
WEB OF KNOWLEDGE™



ULRICH'S  
KNOWLEDGEBASE

№ 4 Часть 2 2022  
№ 4 Part 2 2022

Morskie intelektual 'nye tehnologii



Труды  
Санкт-Петербургского  
государственного морского технического университета



# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 часть 2 2022 Сквозной номер 58

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 № 4 part 2 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,
- Technology of Ship Building. Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production,
- Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary),
- Information-measuring and control systems,
- Physical Fields of Ship, Ocean, Atmosphere and Their Interaction,
- System analysis, foundations of Information Science,
- Automation and Control of Processes and Productions,
- Computer modeling and design automation,
- Mathematical Modelling and Numerical Procedures.

### The journal is coming since 2008

#### Publication frequency — 4 issues per year

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

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (E-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru))

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies".

**Registration Certificate:** ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 of 19.09.2008 issued by Roskomnadzor.

Member of Association of science editors and publishers.

**Address:** Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

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

e-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru)

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results <http://vak.ed.gov.ru>

Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies". Circulation of 100 copies.

Authors and advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

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

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

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2022



ISSN 2073-7173  
ISSN 2588-0233

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

**Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление**

## Главный редактор:

**Н.В. Никитин, д.т.н., профессор**

## Редакционная коллегия

### Заместители главного редактора

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

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта 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

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 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  
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
- **Александр Николаевич Минаев**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Галина Валентиновна Герман**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Алексей Игоревич Притыкин**, доктор технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет
- **Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, professor, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
- **Евгений Борисович Карулин**, кандидат технических наук, доцент, Крыловский государственный научный центр
- **Андрей Григорьевич Шпекторов**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
- **Иван Борисович Друзь**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, Дагестанский государственный технический университет
- **Абдурашид Яруллаевич Яфасов**, доктор технических наук, Калининградский государственный технический университет
- **Юрий Павлович Потехин**, 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
- **Владимир Антонович Туркин**, доктор технических наук, профессор, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
- **Сергей Владимирович Антоненко**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Евгений Геннадьевич Бурмистров**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Сергей Николаевич Павликов**, кандидат технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Сергей Николаевич Беседин**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Владимирович Ярисов**, доктор технических наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта

- **Борис Федорович Дмитриев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Павлович Столяров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Павлович Потехин**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Игорь Григорьевич Захаров**, доктор технических наук, профессор, ЦМКБ «Алмаз»
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Ольга Леонидовна Домнина**, к.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Валерий Иванович Плющаев**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Александр Алексеевич Воршевский** доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Алексей Юрьевич Яковлев**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Вячеслав Анатольевич Дюк**, доктор технических наук, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко» Российской академии наук
- **Ян Янович Эглит**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова

**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
- **Alexander N. Minaev**, Dr. Sci. (Eng), professor, Far Eastern Federal University
- **Galina V. German**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexej I. Pritykin**, Dr.Sci.(Eng), associate professor, Kaliningrad State Technical University
- **Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Siberian state University of water transport
- **Alexey L. Starichenkov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
- **Evgeny B. Karulin**, Ph.D. (Eng), associate professor, Krylov State Research Centre
- **Andrey Spektorov**, Ph.D. (Eng), associate professor, Petersburg Electrotechnical University "LETI"
- **Ivan B. Druz**, Dr. Sci. (Eng.), professor, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), professor, Dagestan State Technical University
- **Abdurashid Y. Yafasov**, Dr. Sci. (Eng), Kaliningrad State Technical University
- **Jurij P. Potechin**, Ph.D. (Eng), associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Vladimir A. Turkin**, Dr. Sci (Eng), professor, Admiral Ushakov Maritime State University
- **Sergey V. Antonenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Far Eastern Federal University
- **Gennadiy P. Kicha**, Dr. Sci. (Eng.), professor, Maritime State University named Admural G. I. Nevelskoy
- **Evgeny G. Burmistrov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga state university of water transport
- **Sergej N. Pavlikov**, Ph.D. (Eng), professor, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University
- **Sergej N. Besedin**, Dr. Sci. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexander I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Vladimir V. Yarisov**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Immanuel Kant Baltic Federal University
- **Boris F. Dmitriev**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Yuri P. Potekhin**, Ph.D. (Eng), Saint Petersburg State Marine Technical University
- **Igor G. Zakharov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, ZMKB "Almaz"
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), professor State marine technical university of Saint-Petersburg

- **Olga L. Domnina**, Ph.D.(Eng), assistant professor, Volga State University of Water Transport
- **Valery I. Plyushchayev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Volga state University of water transport
- **Aleksandr A Vorshevskii**, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Saint Petersburg State Marine Technical University
- **Aleksey Yu. Yakovlev**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Viacheslav A. Diuk**, Dr.Sci. (Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **IAn IA. Eglit**, Dr.Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping



# 51 центральный конструкторско - технологический институт судоремонта

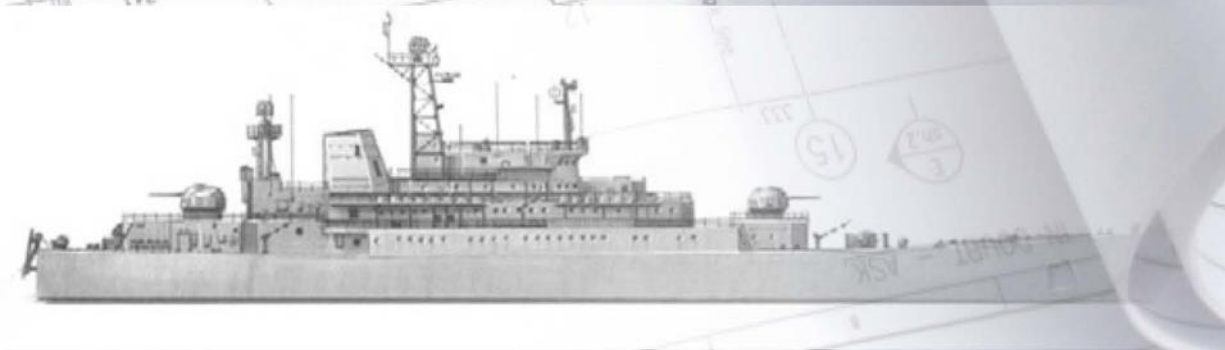
Санкт - Петербург  
190021, Английская наб., д. 38  
Тел./факс: +7 (812) 315-49-45  
Email: office@51cktis.ru

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

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

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

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





**ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

| СОДЕРЖАНИЕ  | стр. |
|---|------|
| К 75-летию Игоря Григорьевича Захарова.....   | 13   |
| <b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ</b>   |      |
| <b>Митюшин А.В., Мишарин М.А., Палагута А.И., Сенишин А.А., Овчинников К.Д.</b> Анализ ходовых качеств автономного необитаемого надводного аппарата осмотрового класса.....   | 19   |
| <b>ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>   |      |
| <b>Коршунов В.А., Манухин В.А., Родионов А.А.</b> Применение и сравнение различных методов вычисления предельных изгибающих моментов корпуса судна.....   | 27   |
| <b>Семенова В.Ю., Альбаев Д.А.</b> Определение амплитуд вторых гармоник нелинейной качки судна на регулярном волнении.....  | 36   |
| <b>Родионов А.А., Карпенко Е.А., Пономарев Д.А.</b> Оценка влияния сопротивления воды при моделировании динамического процесса столкновения судов.....  | 45   |
| <b>ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>  |      |
| <b>Ходжаев Р.С., Сахоненкова А.П., Трусов В.И., Мирославов А.Е., Грибанькова А.А., Пласкеева Е.И.</b> Перспективный материал для защиты от коррозии и обрастания.....   | 51   |
| <b>Фирсова А.В., Щигорцов М.Ю.</b> Технологические особенности и перспективы применения полимерных композиционных материалов при постройке судов.....   | 58   |
| <b>Догадин А.В., Дубинка В.В., Рогозин В.А.</b> Имплементация цифровых технологий размерного контроля на отечественных верфях.....  | 67   |
| <b>СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ<br/>(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)</b>   |      |
| <b>Минасян М.А., Минасян А.М.</b> Методика определения жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения нетрадиционных виброизоляторов MAMSAR на основе экспериментальных статических нагрузочных характеристик..... | 72   |
| <b>Минасян М.А., Минасян А.М.</b> Методика расчета амортизации судового дизель-генераторного агрегата с учетом влияния упорных бортовых, носовых и кормовых виброизоляторов.....  | 80   |
| <b>Белов А.М., Гоняева С.С., Кожемякин В.В., Морозов Н.А.</b> Численное моделирование гидродинамических процессов в тракте теплоносителя забортного теплообменного аппарата.....  | 87   |
| <b>Гоняева С.С., Кожемякин В.В., Морозов Н.А.</b> Использование метано-воздушного и аммиачно-воздушного топлива в двигательно-движительном инжекторе.....   | 92   |
| <b>ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ</b>  |      |
| <b>Мартынов В.Л., Сиек Ю.Л., Борисов А.Н.</b> О роли информационно-измерительных и управляющих систем при поиске объектов подводными аппаратами.....  | 97   |
| <b>Мартынов В.Л., Сиек Ю.Л., Сакович С.Ю., Борисов А.Н.</b> Обеспечение надёжности интегрированных поисковых комплексов на базе информационно-измерительных и управляющих систем.....                                   | 103  |
| <b>Мартынов В.Л., Сиек Ю.Л., Борисов А.Н.</b> Оптимизация информационно-измерительных и управляющих систем подводных аппаратов для повышения эффективности подводного поиска.....                                       | 109  |
| <b>АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ</b>  |      |
| <b>Муктепавел В.О., Карпов В.М., Струков И.Г.</b> Технологические способы создания неразъёмных соединений разнородных материалов.....   | 117  |
| <b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ</b>  |      |
| <b>Ливеринова М.А., Тряскин Н.В.</b> Валидация и верификация акустической модели на задаче обтекания тандема цилиндр – профиль NASA0012.....  | 123  |

| <b>CONTENTS</b>  | page |
|--|------|
| For Igor Zakharov's 75-th anniversary.....   | 13   |
| <b>DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS</b>  |      |
| <b>Anton V. Mityushin, Mikhail A. Misharin., Andrey I. Palaguta, Andrey A. Sinishin., Kirill D. Ovchinnikov</b> Analysis of the driving characteristics of an autonomous unmanned surface vehicle inspection-class.....      | 19   |
| <b>THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS</b>   |      |
| <b>Vladimir A. Korshunov, Vadim A. Manukhin, Aleksandr A. Rodionov</b> Application and comparison of various methods of calculation of ultimate bending moments of ship hull.....  | 27   |
| <b>Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev</b> Determination of the amplitudes of the second harmonics of the non-linear motions of a ship in regular waves.....  | 36   |
| <b>Alexander A. Rodionov, Evgeniya A. Karpenko, Dmitry A. Ponomarev</b> Evaluation of the effect of water resistance in simulation of the dynamic process of ship collision.....   | 45   |
| <b>TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION</b>  |      |
| <b>Rustam S. Xodgaev, Anna P. Sahonenkova, Valery I. Trusov, Aleksandr E. Miroslavov, Angela A. Gribankova, Ekaterina I. Plaskeeva</b> Promising material for protection against corrosion and fouling.....                  | 51   |
| <b>Anna V. Firsova, Mikhail Y. Shchigortsov</b> Technological features and prospects for the use of polymer composite materials in the construction of ships.....  | 58   |
| <b>Alexander V. Dogadin, Vladimir V. Dubinka, Vladimir A. Rogozin</b> Implementation of digital technologies for dimensional control at domestic shipyards.....  | 67   |
| <b>SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)</b>   |      |
| <b>Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan</b> Method of determination of stiffness, damping and absorption coefficients of non-traditional MAMSAR vibration isolators based on experimental static load characteristics.....   | 72   |
| <b>Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan</b> Method for calculating the vibration isolation of a marine diesel generator set, taking into consideration the influence of thrust onboard, bow and stern vibration isolators... | 80   |
| <b>Aleksei M. Belov, Sofya S. Gonyaeva, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov</b> Numerical simulation of hydrodynamic processes in the coolant path of an outboard heat exchanger.....                               | 87   |
| <b>Sofya S. Gonyaeva, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov</b> Use of methane-air and ammonia-air fuel in propulsion injector.....   | 92   |
| <b>INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS</b>   |      |
| <b>Viktor L. Martynov, Yuriy L. Siek, Aleksandr N. Borisov</b> On the role of information-measuring and control systems in the search for objects by underwater vehicles.....  | 97   |
| <b>Viktor L. Martynov, Yuriy L. Siek, Sergej Ju. Sakovich, Aleksandr N. Borisov</b> Ensuring the reliability of integrated search complexes based on information-measuring and control systems.....                          | 103  |
| <b>Viktor L. Martynov, Yuriy L. Siek, Aleksandr N. Borisov</b> Optimization of underwater vehicles information-measuring and control systems to improve the efficiency of underwater search.....                             | 109  |
| <b>AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS</b>   |      |
| <b>Voldemar O. Muktepavel, Vyacheslav M. Karpov, Ilya G. Strukov</b> Technological methods for creating permanent joints of dissimilar materials.....  | 117  |
| <b>MATHEMATICAL MODELLING, AND NUMERICAL PROCEDURES</b>  |      |
| <b>Mariya A. Liverinova, Nikita V. Tryaskin</b> Validation and verification of the acoustic model for the problem of flow around a tandem cylinder – profile NACA0012.....   | 123  |

## К 75-летию Игоря Григорьевича Захарова



26 декабря 2022 года исполнилось 75 лет заместителю генерального конструктора по перспективному проектированию, главному конструктору проекта АО ЦМКБ «Алмаз», доктору технических наук, профессору контр-адмиралу запаса Игорю Григорьевичу Захарову, одному из ведущих специалистов современного отечественного кораблестроения.

Игорь Григорьевич родился в Ленинграде. После окончания школы поступил в Ленинградский кораблестроительный институт. Однако, окончив два курса, понял, что его призвание – это Военно-Морской Флот. В 1967 году по собственной инициативе, он перешел на второй курс кораблестроительного факультета Высшего военно-морского инженерного училища им. Ф.Э. Дзержинского, которое окончил в 1971 году.

Служба молодого лейтенанта проходила на кораблях Черноморского и Северного флотов: командиром группы на БПК «Сметливый» (рис. 1).



Рис.1. БПК пр.61

Затем на первом отечественном авианосце – головном авианесущем крейсере проекта 1143 «Киев» (рис.2). Знакомство с крейсером И.Г. Захарова началось еще в процессе строительства корабля на Черноморском судостроительном заводе в Николаеве. Это было не только познавательно, но и способствовало профессиональному становлению перспективного инженера-кораблестроителя.



Рис.2. Авианесущий крейсер пр. 1143 «Киев»

Пять лет корабельной службы явились хорошей практикой для дальнейшего служебного роста. Это и произошло в 1977 году – Игорь Григорьевич поступил на кораблестроительный факультет Военно-морской академии им. А.А. Гречко. После окончания с отличием академии в 1979 году его служба проходила в военном представительстве и в Главном управлении кораблестроения ВМФ.

Однако истинным призванием И.Г. Захарова была наука. В 1983 году после успешной защиты кандидатской диссертации он был назначен преподавателем в Военно-морскую академию, а в 1989 году стал старшим преподавателем кафедры военного кораблестроения. Здесь он разработал новый курс теории проектирования надводных кораблей и создал курс концептуального анализа в военном кораблестроении. Под его руководством была создана исследовательская и обучающая система автоматизированного проектирования кораблей «Оценка».

В 1988 году состоялась защита докторской диссертации, а четыре года спустя, в 1992 году он был назначен начальником 1 Центрального научно-исследовательского института МО РФ. Для страны, Вооруженных Сил и флота это были трудные годы, рушилось многое, в том числе и в военно-морской науке. Новому начальнику 1 ЦНИИ МО РФ предстояло не только защитить Институт от пагубных тенденций, но и найти пути его развития в новых условиях. Эту задачу контр-адмирал И.Г. Захаров решил и решил с успехом (рис.3).



Рис.3. начальник 1 ЦНИИ МО РФ И.Г. Захаров

Институт не только сохранил свои позиции в отечественном кораблестроении, но и получил дальнейшее развитие. Одним из принципиальных направлений в научной деятельности Института явилось дальнейшее развитие и совершенствование системы автоматизированного исследовательского проектирования кораблей и судов (САИПР «Чертеж-4»). Личной заслугой И.Г. Захарова явилось внедрение в САИПР метода многокритериальной оптимизации многоцелевого боевого корабля (рис.4).

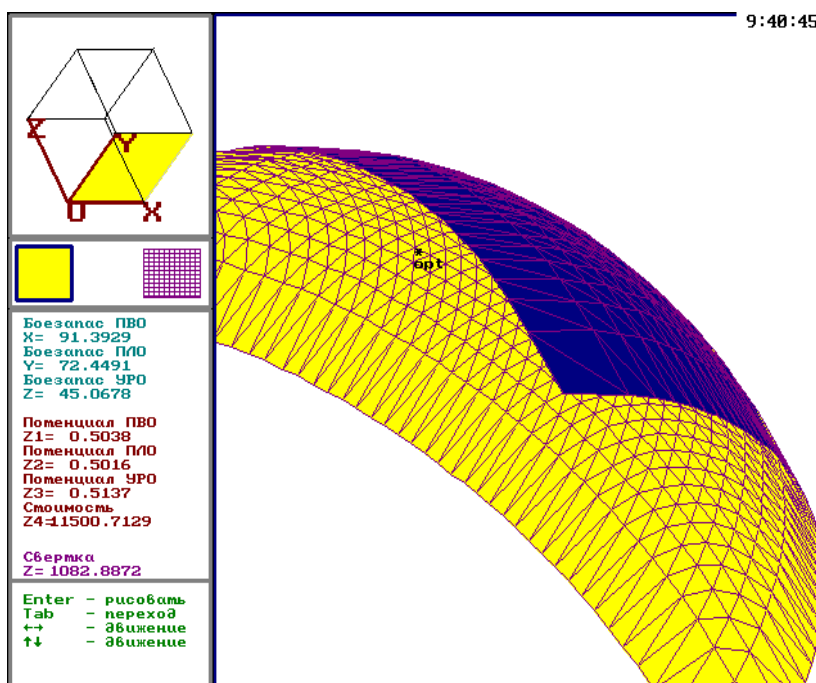


Рис. 4. Визуализация области Парето

Активное внедрение САИПР в научную деятельность Института позволило начинать процесс проектирования корабля с формирования общего замысла по его созданию, основываясь на возлагаемые на корабль задачи и достижения научно-технического прогресса (рис.5).

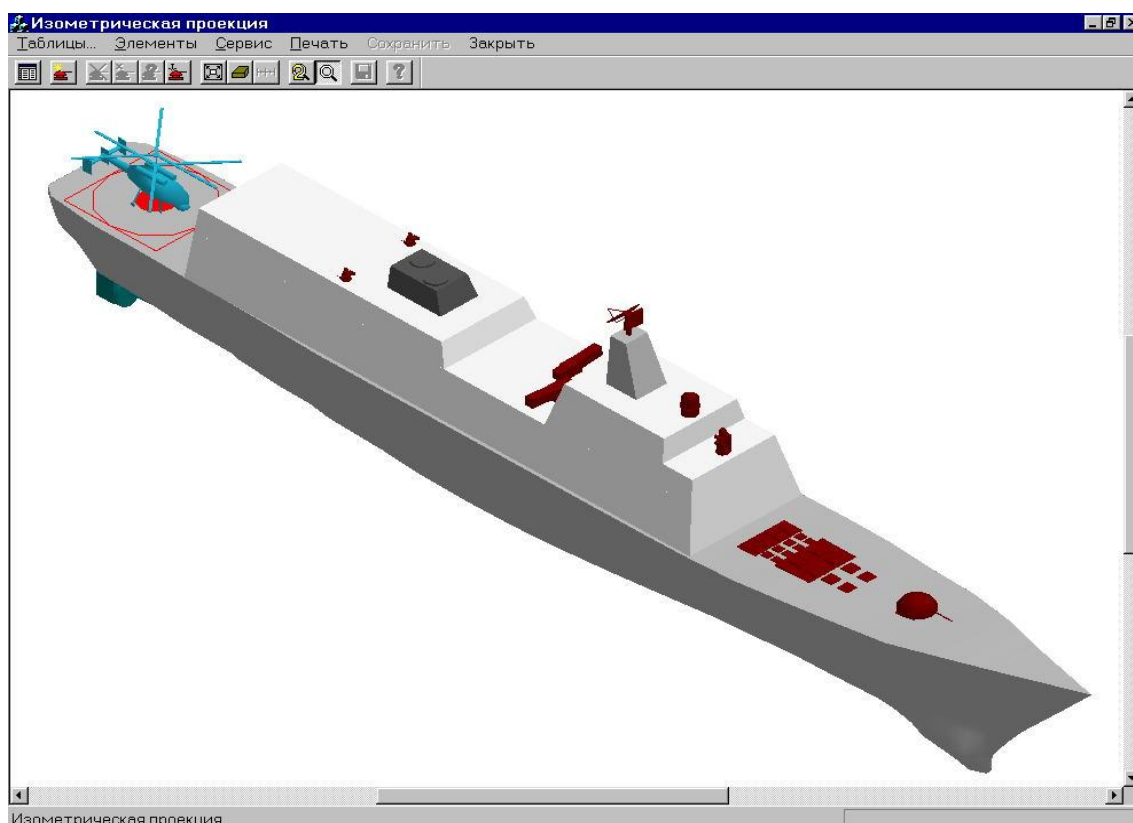


Рис.5. 3-D проекция исследовательского проекта фрегата

Возглавляя Институт, И.Г. Захаров внес весомый личный вклад в обоснование направлений развития корабельного состава ВМФ России, создание уникальной лабораторно-экспериментальной базы, разработку нормативных, методических и эксплуатационных документов флота, создание автоматизированных систем моделирования и проектирования кораблей, теоретического аппарата анализа мирового рынка военного кораблестроения. Результаты этой работы получили реализацию в концепциях развития ВМФ различных годов, в проектах Государственных программ вооружения и экспортных программах кораблестроения. И.Г. Захаров активно возглавлял разработку комплексных целевых программ при строительстве головных подводных лодок и надводных кораблей четвертого поколения. Под его руководством были разработаны ТТЗ на создание корвета проекта 20380 типа «Стерегущий» и фрегата проекта 22350 типа «Адмирал Флота Советского Союза Горшков».

После ухода в 2006 году в запас И.Г. Захаров работал Главным научным сотрудником 1 Центрального научно-исследовательского института МО РФ, с 2008г. – руководителем подразделения, вице-президентом ОАО «Объединенная судостроительная корпорация». С 2010 г. по настоящее время И.Г. Захаров – заместитель генерального конструктора АО ЦМКБ «Алмаз» по перспективному проектированию и главный конструктор перспективного корвета нового поколения проекта 20386 (рис.6).

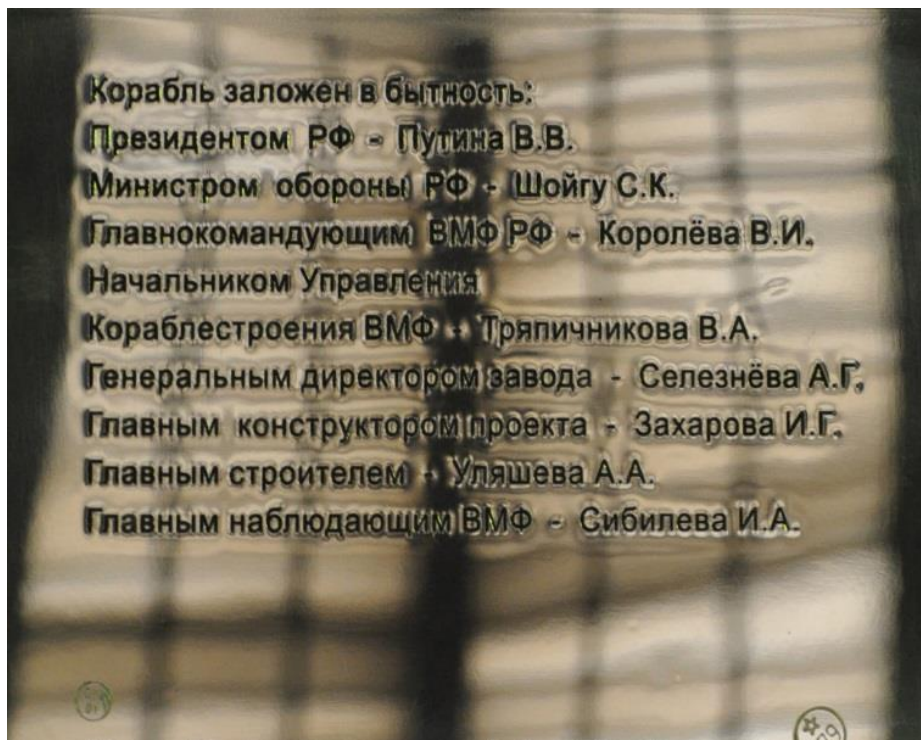


Рис.6. Закладная доска Корвета. Гл. конструктор И.Г. Захаров

Основными направлениями научной деятельности доктора технических наук, профессора И.Г. Захарова являются: разработка методов решения задач оптимизации сложных военно-технических систем, теоретические основы концептуального проектирования, методы автоматизированного исследовательского проектирования, научные принципы и методы обоснования кораблестроительных программ, теория и методы маркетинговых исследований при формировании экспортных программ (рис.7,8,9).



Рис. 7. Корвет проекта 20380



Рис. 8. Фрегат проекта 22350

И.Г. Захаров – автор около 200 научных трудов, в том числе двух учебников и пяти монографий. Награжден орденами: «За службу Родине в ВС СССР» 3 степени (1977), «Почета» (1995), «За военные заслуги» (2000), медалями, лауреат Государственной премии РФ (2002).



Рис. 9. Корвет проекта 20386

**Сердечно поздравляем, Вас уважаемый Игорь Григорьевич с юбилеем, желаем здоровья, счастья и дальнейших успехов в Вашей плодотворной деятельности на благо России.**

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.5.016

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.001>

### Анализ ходовых качеств автономного необитаемого надводного аппарата осмотрового класса

А.В. Митюшин<sup>1</sup> tokha.m.74@mail.ru, М.А. Мишарин<sup>1</sup> miwarin.m@mail.ru,  
А.И. Палагута<sup>1</sup> andreykapalaguta22@gmail.com, А.А. Сенишин<sup>1</sup> andrey24-95@mail.ru,  
К.Д. Овчинников<sup>1</sup> ovchinnikov\_kd@mail.ru

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

**Аннотация.** В работе рассматриваются варианты улучшения ходовых характеристик малого автономного необитаемого надводного аппарата осмотрового класса. Аппарат был разработан и построен в ФГБОУ ВО СПбГМТУ. В процессе опытной эксплуатации аппарата были обнаружены проектные недостатки: аппарат «тяжело» проходил по заданному маршруту в условиях ветра и волнения. Для анализа динамики аппарата было произведено экспериментальное и численное исследования, по результатам которых сформированы рекомендации по выбору формы корпуса, состава и расположения движительно-рулевого комплекса и компоновки электроэнергетической системы аппарата. В качестве рекомендуемой формы корпуса были выбраны обводы с круглой скулой и туннельным типом кормовой оконечности, позволяющие не только снизить полное сопротивление на рассматриваемых скоростях хода в сравнении с другими вариантами обводов, но и защитить движительный комплекс от внешних воздействий во время эксплуатации. При анализе работы движительной установки было обнаружено, что установленные электродвигатели работают на нижнем пределе своих возможностей. Для достижения желаемых ходовых показателей необходимо увеличивать напряжение электроэнергетической системы. Для анализа применимости предлагаемых мер были выполнены расчеты в программе численного моделирования гидродинамики OpenFOAM и проведены экспериментальные исследования в опытовом бассейне. Согласно полученным результатам предложенные варианты модернизации можно считать успешными и рекомендуемыми при дальнейшей разработке и модернизации аппарата.

**Ключевые слова:** Автономный необитаемый надводный аппарат, катамаран, проектирование, ходовые испытания, численное моделирование, CFD, опытовый бассейн.

**Финансирование:** при поддержке Фонда содействия инновациям по программе Умник-Маринет [1].

**Для цитирования:** Митюшин А.В., Мишарин М.А., Палагута А.И., Сенишин А.А., Овчинников К.Д. Анализ ходовых качеств автономного необитаемого надводного аппарата осмотрового класса, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 19—26

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.001>

### Analysis of the propulsion characteristics of an autonomous inspection-class unmanned surface vehicle

Anton V. Mityushin<sup>1</sup> tokha.m.74@mail.ru, Mikhail A. Misharin<sup>1</sup> miwarin.m@mail.ru,  
Andrey I. Palaguta<sup>1</sup> andreykapalaguta22@gmail.com, Andrey A. Sinishin<sup>1</sup> andrey24-95@mail.ru,  
Kirill D. Ovchinnikov<sup>1</sup> ovchinnikov\_kd@mail.ru

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

**Abstract.** The paper considers options for improving the propulsion characteristics of a small autonomous inspection class unmanned surface vehicle (USV). The USV was designed and built in SMTU in St. Petersburg, Russia. During the lake and river trials of the USV, design defects were discovered: the device passed hard along a given route in wind and waves conditions. The experimental and numerical studies carry out to analyze the dynamics of the USV. Based on the results recommendations form for choosing the hull shape, the composition and location of the propulsion-steering complex and the layout of the electric power system. The contours with a round chine and a tunnel type of aft end choose as the recommended hull shape, which allows not only to reduce the total resistance at the considered travel speeds in comparison with other hulls, but also to protect propellers from external influences during operation. It founds that the installed electric motors operate at the lower limit of their capabilities. To achieve the desired running performance, it is necessary to increase the voltage of the electric power system. For analyse of applicability of the proposed measures the calculations perform in the CFD program OpenFOAM and experimental studies carry out in the towing tank. According to the results obtained the proposed modernization options can be considered successful and recommended for further development of the device.

**Keywords:** Unmanned surface vehicle, catamaran, design, run trials, numerical simulation, CFD, towing tank.

**Financial Support:** Innovation Protection Fund Program Umnik-Marinet [1].

**For citation:** Anton V. Mityushin, Mikhail A. Misharin, Andrey I. Palaguta, Andrey A. Sinishin, Kirill D. Ovchinnikov Analysis of the propulsion characteristics of an autonomous inspection-class unmanned surface vehicle, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 19—26.

## Введение

В настоящее время идёт активное внедрение морских необитаемых аппаратов для выполнения широкого спектра речных и морских работ. Текущие и будущие перспективы развития аппаратов представлены в [2].

Работы [3, 4, 5] показывают опыт создания автономного надводного необитаемого аппарата (далее – АННА) для проведения батиметрических съёмок для периодического обновления навигационных карт и количественной оценки требований к дноуглублению. Практическое моделирование аппарата, техническая информация и последовательность проектирования описаны в статье [6].

Исследование [7] обобщает состояние развития автономных аппаратов с точки зрения принятия решений и контроля.

В работе [8] представлено решение для проверки свойств и качества воды с помощью АННА, который минимизирует временные затраты на мониторинг.

Авторы [9] демонстрируют успехи применения аппарата на чрезвычайно мелководных пространствах. АННА позволяет улучшить мониторинг антропогенного воздействия на экосистемы водоёмов.

Обычно АННА осмотрового класса имеют небольшие размеры, которые позволяют проводить исследования в районах, близких к береговой линии, под мостами, где использование лодок с экипажем затруднено или опасно. В статьях [10, 11, 12] описываются алгоритмы построения маршрутов движения АННА.

В рамках реализации внутренней научно-исследовательской работы ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» был разработан и построен АННА осмотрового класса. При разработке аппарата использовались алгоритмы, представленные в работах [13, 14, 15, 16, 17, 18].

АННА предназначен для автономного измерения глубин при выполнении съёмки рельефа на внутренних водоёмах и мелководных участках шельфа с помощью эхолота. Аппарат строился как платформа под полезную нагрузку для решения исследовательских и эксплуатационных задач путем установки необходимого оборудования [19, 20].

По результатам проектирования был построен экспериментальный образец [21] со следующими характеристиками (рис. 1):

- конструктивная схема – катамаран;
- длина  $x$  ширина  $x$  высота борта одного корпуса  $L$   
 $x B_1 x H_1 = 1,40 x 0,2 x 0,16$  м;
- ширина габаритная  $B = 1$  м;
- водоизмещение  $D = 42$  кг;
- масса / объём полезной нагрузки – 10 кг / 20 л;
- движительно-рулевой комплекс (далее – ДРК) – два полнопогружных электродвигателя BlueRobotics T200 [22] суммарной номинальной мощностью ~780 Вт.



Рис. 1. АННА осмотрового класса СПбГМТУ

В процессе опытной эксплуатации АННА были обнаружены проектные недостатки: аппарат «тяжело» проходил по заданному маршруту в условиях ветра и волнения. Для анализа динамики аппарата было произведено экспериментальное (в опытовом бассейне ФГБОУ ВО СПбГМТУ) и численное исследование, по результатам которых сформированы рекомендации по выбору формы корпуса, состава и расположения движительно-рулевого комплекса и компоновки электроэнергетической системы аппарата. Результаты исследований представлены в настоящей работе.

## Экспериментальное исследование аппарата

Размеры аппарата позволили провести полноразмерные самоходные испытания в опытовом бассейне кафедры теории корабля СПбГМТУ, имеющем следующие характеристики: длина по зеркалу воды – 35,7 м; ширина котлована – 5,5 м; наибольшая глубина воды – 2,5 м [23].

Для движения аппарата использовались штатные системы: два электродвигателя BlueRobotics T200 были подключены к аккумуляторной батарее с номинальным напряжением 12,8 В. При испытаниях с помощью штатной системы дистанционного управления аппарата задавалась нагрузка двигателя в процентах от максимально-возможной мощности. При этом аппарат был подключен к системе замера скорости в опытовом бассейне.

По результатам испытаний было получено:

- при нагрузке двигателей 20 % скорость движения аппарата 0,90 м/с; 40 % – 1,44 м/с; 60 % – 1,48 м/с; дальнейшее увеличение мощности не производилось, так как было очевидно, что достигнут некоторый максимум, который аппарату сложно преодолеть;

- при этом наблюдался подсос воздуха двигателями, что, очевидно, снижало КПД движительной установки;

- при посадке на ровный киль наблюдалось сильное заливание носовой оконечности, которое было устранено посадкой аппарата с небольшим дифферентом на корму.

На рис. 2 представлена картина обтекания аппарата при движении на максимально достигнутой скорости 1,48 м/с. На рисунке видно, что основная ходовая волна имеет сильную впадину около мидель-шпангоута судна, что может приводить к

подсосу воздуха движителями. Также видна носовая волна, которая при посадке на ровный киль начинает заливать носовую оконечность.



Рис. 2. Картина обтекания аппарата при скорости хода 1,48 м/с

Поскольку максимальная мощность не была достигнута, в том числе по причине подсоса воздуха гребными винтами, были изготовлены новые крепления электродвигателей, позволяющие их заглубить на 0,1 м ниже базового уровня. Строго говоря, такое решение не является оптимальным, так как увеличивает осадку аппарата и делает гребные винты не защищенными от внешних воздействий. Однако, для анализа влияния подсоса воздуха движителями на ходовые качества аппарата такой вариант считается приемлемым.

По результатам вторых испытаний было получено:

- при нагрузке движителей 20 % скорость движения аппарата 0,75 м/с; 40 % – 1,30 м/с; 60 % – 1,57 м/с; 80 % – 1,62 м/с; 100 % – 1,65 м/с;
- подсос воздуха движителями не наблюдался;
- посадка аппарата во время движения была более благоприятная, благодаря дифференцирующему моменту, создаваемому движителями.

На рис. 3 представлена картина обтекания аппарата при движении на максимально достигнутой скорости 1,65 м/с.



Рис. 3. Картинка обтекания аппарата при скорости хода 1,65 м/с

По результатам очевидно, что новая система крепления увеличила сопротивление аппарата, что хорошо видно при низких значениях нагрузки движителей. Однако, благодаря устранению подсоса воздуха при мощностях от 60 % и выше скорость аппарата значительно выросла. Тем не менее, для успешной эксплуатации аппарата на реках и озерах в условиях течения, ветра и волнения необходимо дальнейшее увеличение максимально возможной скорости, как минимум до значения 2,5 м/с.

Для улучшения ходовых характеристик аппарата было выбрано два направления исследований:

- модернизация обводов корпуса;
- модернизация движительной установки.

### Модернизация обводов корпуса

В качестве альтернативных были разработаны несколько вариантов обводов корпуса. Наиболее важными пунктами модернизации, помимо обводов, были:

- увеличение относительного удлинения корпуса. У построенного объекта относительное удлинение  $L/B = 7$ , что мало для основного режима эксплуатации аппарата. Было принято решение увеличения относительного удлинения корпуса до  $L/B = 10$ ;
- отказ от цилиндрической вставки, которая на расчетных скоростях хода негативно влияет на волнообразование корпуса;
- увеличение высота надводного борта в носовой оконечности для ограничения заливаемости.

Было разработано около 10 вариантов обводов корпуса, из которых наиболее удачными и интересными были:

- корпус с глубоко погруженным транцем и острой скулой (рис. 4). Обводы корпуса основаны на традиционном представлении высокоскоростного судна. Следует отметить, что такие обводы корпуса требовали серьезного пересмотра движительной установки в пользу водометного движителя;
- корпус с туннельными кормовыми обводами и круглой скулой (рис. 5). Туннельный тип кормовой оконечности благоприятно влияет на ограничение подсоса воздуха движительной установкой, а также защищает её от внешних механических воздействий. Удлинение корпуса и выбор более плавных обводов должны благоприятно сказаться на обтекании корпуса при малых и средних скоростях хода.

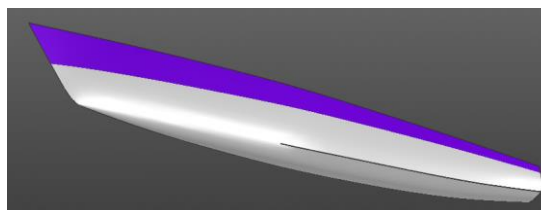


Рис. 4. Трехмерная модель корпуса с глубоко погруженным транцем и острой скулой

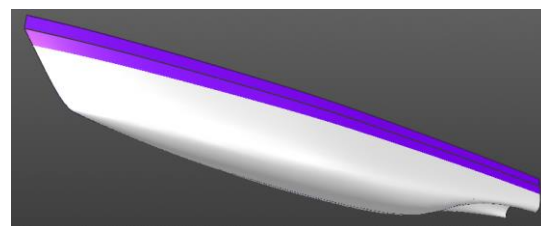


Рис. 5. Трехмерная модель корпуса с туннельными кормовыми обводами и круглой скулой: общий вид (сверху) и вид с установленным движителем BlueRobotics T200 (снизу)

Для оценки значений полного сопротивления разработанных альтернативных обводов корпуса были выполнены расчеты в программном комплексе вычислительной гидродинамики OpenFOAM [24,25,26].

Результаты расчетов представлены на рис. 6, на котором приняты следующие условные обозначения: корпус 1 – корпус с глубоко погруженным транцем и острой скулой, корпус 2 – корпус с туннельными кормовыми обводами и круглой скулой.

Здесь следует отметить, что построенный корпус рассчитывался с некоторым дифферентом на корму, что соответствует его реальным условиям эксплуатации, связанным с заливаемостью носовой оконечности. Остальные корпуса рассчитывались при посадке на ровный киль.

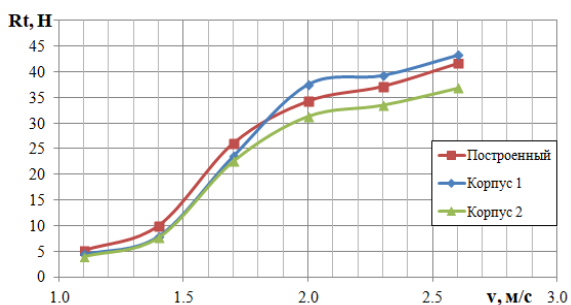


Рис. 6. Результаты расчетов

По представленным данным очевидно, что корпус 1 (корпус с глубоко погруженным транцем и острой скулой) не подходит для движения в рассматриваемых скоростях хода. Вероятно, корпус 1 будет эффективным при дальнейшем повышении скорости хода, которое, однако, нас в данном исследовании не интересует.

Корпус 2 (корпус с туннельной кормовой оконечностью и круглой скулой), в свою очередь, является приоритетным вариантом для модернизации, обеспечивая во всем диапазоне скоростей падение сопротивления не менее 9 %. При этом двигательный комплекс защищен как от внешнего механического воздействия, так и от подсоса воздуха, что должно сыграть благоприятную роль на эксплуатацию аппарата.

Однако очевидно, что представленное падение сопротивления, хоть и небольшое, но в любом случае недостаточное для обеспечения желаемой максимальной скорости хода 2,5 м/с. По этой причине необходимо более подробно рассмотреть работу двигательного комплекса.

### Модернизация двигательной установки

При проведении испытаний в опытовом бассейне два электродвигателя были подключены к одной аккумуляторной батарее номинальным напряжением 12,8 В. В процессе эксплуатации, под нагрузкой, в системе напряжение падало до 10-11 В. Строго говоря, установленные двигатели предназначены для эксплуатации в диапазоне напряжений от 10 до 20 В (времененно до 25 В) [22]. Это означает, что физически двигатели находились на нижней границе своих возможностей.

Анализируя данные, представленные производителем двигателей [22], были построены кривые тяги одного двигателя в идеальных условиях

от относительной поступи стандартного установленного гребного винта, представленные на рис. 7. На рис. 8 представлено сравнение тяговых характеристик двух двигателей при фактическом рабочем напряжении 10 В и кривой сопротивления построенного корпуса без выступающих частей.

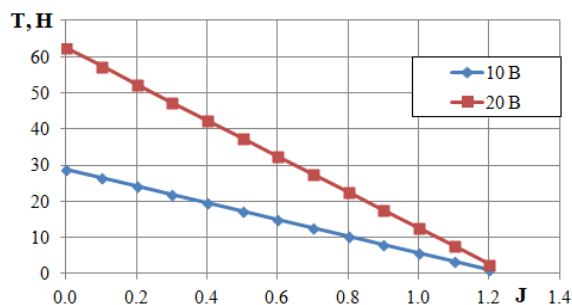


Рис. 7. Кривые тяги одного электродвигателя BlueRobotics T200 в идеальных условиях в зависимости от напряжения питания

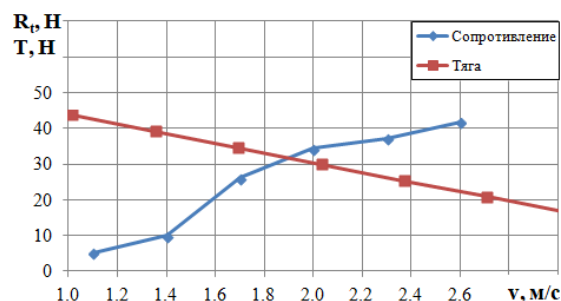


Рис. 8. Кривые тяги двигателя в зависимости от номинального напряжения

На рис. 8 точка пересечения кривых является точкой достижимой скорости хода аппарата в идеальных условиях, равной 1,90 м/с. В действительности максимальная скорость аппарата 1,65 м/с. Такая разница может быть обусловлена, в первую очередь, отсутствием в расчете сопротивления корпуса выступающих частей, в том числе стоек крепления двигателя и самих двигателей.

В любом случае график, представленный на рис. 8 показывает, что максимально возможная скорость аппарата в исследуемых условиях эксплуатации будет не больше 1,90 м/с, что значительно меньше желаемой скорости хода. Следовательно, необходимо увеличивать напряжение системы энергоснабжения для увеличения тяги и мощности, выдаваемых двигателями.

### Результаты модернизации

Выше был выполнен анализ вариантов, направленных на улучшение ходовых характеристик аппарата. Следует заключить следующее:

- разработанная форма корпуса с туннельным типом кормовой оконечности и круглой скулой имеет полное сопротивление не менее, чем на 9 % ниже, чем уже построенный корпус. При этом, новые обводы имеют благоприятные показатели высоты надводного борта и расположения центра величины, которые должны улучшить посадку аппарата в процессе эксплуатации, а туннельные кормовые

обводы должны защитить гребной винт от подсоса воздуха и внешних механических воздействий;

- для улучшения показателей работы движительной установки необходимо увеличивать напряжение бортовой системы энергообеспечения. Тогда в случае необходимости работы на высоких скоростях хода, двигатели смогут дать необходимую тягу.

Для анализа успешности предлагаемых модернизаций проведен второй этап испытаний в опытовом бассейне СПбГМТУ. При этом использовался уже построенный корпус со следующими изменениями:

- на корпус установлены пластины, защищающие двигатели от подсоса воздуха. То есть сделан упрощенный вариант туннельных кормовых обводов;

- бортовая система энергообеспечения состоит либо из одной аккумуляторной батареи номинальным напряжением 19,2 В, либо двух последовательно соединенных аккумуляторных батарей, дающих суммарно номинальное напряжение 24,8 В.

В результате испытаний получено следующее:

- установленные на корпус пластины, к сожалению, желаемого результата не дали. Двигатель, как и ранее, при скорости выше 1,60 м/с имел подсос воздуха. В связи с этим двигатели были установлены на удлиненные стойки, заглубляющие гребные винты на дополнительные 0,1 м (рис. 9);

- при установке аккумуляторной батареи номинальным напряжением 19,2 В при полной нагрузке скорость хода аппарата увеличилась до 2,25 м/с. При этом срабатывал датчик защиты аккумулятора от перепада напряжения, и двигатели иногда отключались. Это говорит о том, что фактическое напряжение на двигателях было, скорее всего, не более 16 В;

- при установке двух последовательно соединенных аккумуляторных батарей, дающих суммарно номинальное напряжение 24,8 В, при полной нагрузке скорость хода аппарата достигла 2,65 м/с. При этом фактическое напряжение в системе при нагрузке двигателей доподлинно неизвестно.



Рис. 9. Результаты модернизации построенного корпуса с целью улучшения его ходовых характеристик

### Заключение

В работе освещены аспекты модернизации построенного АННА в связи с наличием у него проблем в реальных условиях эксплуатации, связанных с недостаточной максимальной скоростью хода.

Для улучшения ходовых характеристик были предложены решения по изменению формы корпусов и компонентов электроэнергетической установки. В ходе расчетов наиболее перспективным оказался корпус с туннельной кормовой оконечностью и круглой скулой, позволяющий не только снизить полное сопротивление в сравнении с другими корпусами, но защитить движительный комплекс от подсоса воздуха. Электроэнергетическая система АННА была проанализирована и переоборудована. Для успешной эксплуатации аппарата необходимо увеличивать рабочее напряжение системы. Так, например, при использовании двух последовательно соединенных батареи номинальным напряжением 24,8 В скорость аппарата достигла 2,65 м/с.

По результатам испытаний следует заключить, что предложенные варианты модернизации как обводов корпуса, так и бортовой системы энергоснабжения можно считать успешными и рекомендуемыми при дальнейшей разработке и модернизации аппарата.

### Литература

1. Умник-Программа поддержки талантливой молодежи. [Электронный ресурс]. - URL: <https://fasie.ru/programs/programma-umnik/>.
2. Brizzolara, S., Brizzolara, R.A. (2016). Autonomous Sea Surface Vehicles. In: Dhanak, M.R., Xiros, N.I. (eds) Springer Handbook of Ocean Engineering. Springer Handbooks. Springer, Cham.
3. L. D, K. Murali, K. Chitra and K. Raju, "Unmanned Autonomous Surface Vehicle for the Shallow Water Bathymetry Applications," OCEANS 2022 - Chennai, 2022, pp. 1-7.
4. Jalakas, T. Möller, K. Tabri and M. Enoh, "Design and Testing of an Universal Autonomous Surface Vehicle," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2021, pp. 705-710.
5. Bibin Wilson, Anand Singh, Amit Sethi. «Shallow Water Bathymetry Survey using an Autonomous Surface Vehicle». Systems and Control (eess.SY); Robotics (cs.RO), 18 Jul 2022.
6. Thalia A. Morel, Jose Mar'ia Manzano, Guillermo Bejarano, Luis Orihuela. «Modelling and Identification of an Autonomous Surface Vehicle: Technical Report». Departamento de Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad Loyola Andalucía. February 2022.

7. Qing Cai Sr., Feng Li. Development status and trend of autonomous operation for unmanned surface vehicle. International Conference on Computer Application and Information Security (ICCAIS 2021), 2021, Wuhan, China.
8. M.M Rashid, Rupal Roy, Md Manjurul Ahsan, Zahed Siddique. Design and Development of an Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring. Systems and Control (eess.SY); Hardware Architecture (cs.AR). 26 Jan 2022.
9. M. Bibuli, R. Ferretti, A. Odetti and T. Cosso, "River Survey Evolution by means of Autonomous Surface Vehicles," 2021 International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), 2021, pp. 412-417, doi: 10.1109/MetroSea52177.2021.9611629.
10. Mei, X.; Han, D.; Saeed, N.; Wu, H.; Chang, C.-C.; Han, B.; Ma, T.; Xian, J. Trajectory Optimization of Autonomous Surface Vehicles with Outliers for Underwater Target Localization. Remote Sens. 2022, 14, 4343.
11. Nikishin V., Durmanov M., Skorik I.: Autonomous Unmanned Surface Vehicle for Water Surface Monitoring. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 14, No. 4, doi:10.12716/1001.14.04.09, pp. 853-858, 2020.
12. Andy Annamalai, A Motwani, Sanjay Sharma, Rhondasutton Sutton, C Yang, Phil Culverhouse. Integrated navigation, guidance and control systems for an uninhabited surface vehicle. The International Journal of Small Craft Technology.
13. Занин В.Ю. [и др.] / Разработка автономных необитаемых подводных аппаратов класса микро с функцией группового управления // Известия ЮФУ. Тематический выпуск. Перспективные системы и задачи управления. 2017. № 1(186). С. 55–74.
14. Овчинников К.Д., Франк М.О., Лавриненко А.В. Корректировка математической модели создания автономного необитаемого надводного аппарата осмотрового класса по результатам постройки и испытаний экспериментального образца. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; Специальный выпуск 1: 115–121.
15. M. H. A. Majid and M. R. Arshad, "Design of an autonomous surface vehicle (ASV) for swarming application," 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2016, pp. 230-235, doi: 10.1109/AUV.2016.7778676.
16. M. Abduljabbar, R. A. Sneineh, Y. Qiblawey, Y. Orabi and N. Meskin, "Design and implementation of autonomous surface vehicle," 2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 2018, pp. 287-292, doi: 10.1109/MELCON.2018.8379109.
17. R Krzysztof Sornek, Jakub Wiercioch, Dominika Kurczynna, Rafał Figaj, Bartłomiej Wójcik, Maciej Borowicz, Mateusz Wieliński, Development of a solar-powered small autonomous surface vehicle for environmental measurements, Energy Conversion and Management, Volume 267, 2022, 115953, ISSN 0196-8904.
18. Выбор формы корпуса автономного необитаемого надводного аппарата с помощью современных средств вычислительной гидродинамики / А. В. Лавриненко, Е. В. Ермолаева, М. О. Франк [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4-1(42). – С. 71-75. – EDN YXQYCL.
19. Sonobot. Configuration options [Электронный ресурс]. - EvoLogics: сайт. URL: <https://evologics.de/sonobotconfiguration-options> (дата обращения: 01.12.2021).
20. Разработка автономных необитаемых подводных глайдеров / Кожемякин И.В. [и др.] // Известия ЮФУ. Тематический выпуск, Перспективные системы и задачи управления. 2013. № 3(140). С. 31–39.
21. Результаты постройки экспериментального образца малого автономного необитаемого надводного аппарата / К. Д. Овчинников, Н. В. Тряскин, А. В. Лавриненко [и др.] // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 25. – EDN LEAJRD.
22. Blue Robotics [Электронный ресурс]. - URL: <https://bluerobotics.com/> (дата обращения: 05.12.2021).
23. Борисов Р.В., Семенова В.Ю. Качка корабля. Учеб. Пособие. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2015.
24. Ткаченко И.В. Современные методы решения задач гидродинамики: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. – 59 с.
25. OpenFOAM [Электронный ресурс]. - URL: <https://openfoam.org/> (дата использования: 05.12.2021).
26. Овчинников К.Д., Тряскин Н.В., Ткаченко И.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии, № 2 (28) т.1 2015.

#### References

1. Umnik - A program to support talented youth. URL: <https://fasie.ru/programs/programma-umnik/>.
2. Brizzolara, S., Brizzolara, R.A. (2016). Autonomous Sea Surface Vehicles. In: Dhanak, M.R., Xiros, N.I. (eds) Springer Handbook of Ocean Engineering. Springer Handbooks. Springer, Cham.
3. L. D, K. Murali, K. Chitra and K. Raju, "Unmanned Autonomous Surface Vehicle for the Shallow Water Bathymetry Applications," OCEANS 2022 - Chennai, 2022, pp. 1-7.
4. Jalakas, T. Möller, K. Tabri and M. Enok, "Design and Testing of an Universal Autonomous Surface Vehicle," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2021, pp. 705-710.
5. Bibin Wilson, Anand Singh, Amit Sethi. «Shallow Water Bathymetry Survey using an Autonomous Surface Vehicle». Systems and Control (eess.SY); Robotics (cs.RO), 18 Jul 2022.
6. Thalia A. Morel, Jose María Manzano, Guillermo Bejarano, Luis Orihuela. «Modelling and Identification of an Autonomous Surface Vehicle: Technical Report». Departamento de Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad Loyola Andalucía. February 2022.
7. Qing Cai Sr., Feng Li. Development status and trend of autonomous operation for unmanned surface vehicle. International Conference on Computer Application and Information Security (ICCAIS 2021), 2021, Wuhan, China.
8. M.M Rashid, Rupal Roy, Md Manjurul Ahsan, Zahed Siddique. Design and Development of an Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring. Systems and Control (eess.SY); Hardware Architecture (cs.AR). 26 Jan 2022.

9. M. Bibuli, R. Ferretti, A. Odetti and T. Cosso, "River Survey Evolution by means of Autonomous Surface Vehicles," 2021 International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), 2021, pp. 412-417, doi: 10.1109/MetroSea52177.2021.9611629.
10. Mei, X.; Han, D.; Saeed, N.; Wu, H.; Chang, C.-C.; Han, B.; Ma, T.; Xian, J. Trajectory Optimization of Autonomous Surface Vehicles with Outliers for Underwater Target Localization. *Remote Sens.* 2022, 14, 4343.
11. Nikishin V., Durmanov M., Skorik I.: Autonomous Unmanned Surface Vehicle for Water Surface Monitoring. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 14, No. 4, doi:10.12716/1001.14.04.09, pp. 853-858, 2020.
12. Andy Annamalai, A Motwani, Sanjay Sharma, Rhondasutton Sutton, C Yang, Phil Culverhouse. Integrated navigation, guidance and control systems for an uninhabited surface vehicle. *The International Journal of Small Craft Technology*.
13. Zanin V. et al. Development of Autonomous Micro-class Uninhabited Surface Vehicles with a Group Control Function // *Proceedings of the Southern Federal University. Special Issue. Promising Systems and Control Problems.* 2017. No. 1(186). P. 55–74 (in Russian).
14. Ovchinnikov K., Frank M., Lavrinenko A. Correction of the mathematical model for creation of an autonomous inspection-class uninhabited surface vehicle by the results of construction and testing of an experimental specimen. *Transactions of the Krylov State Research Centre.* 2020; Special Edition 1: 115–121 (in Russian).
15. M. H. A. Majid and M. R. Arshad, "Design of an autonomous surface vehicle (ASV) for swarming application," 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2016, pp. 230-235, doi: 10.1109/AUV.2016.7778676.
16. M. Abduljabbar, R. A. Sneineh, Y. Qiblawey, Y. Orabi and N. Meskin, "Design and implementation of autonomous surface vehicle," 2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 2018, pp. 287-292, doi: 10.1109/MELCON.2018.8379109.
17. R Krzysztof Sornek, Jakub Wierciuch, Dominika Kurczynna, Rafał Figaj, Bartłomiej Wójcik, Maciej Borowicz, Mateusz Wieliński, Development of a solar-powered small autonomous surface vehicle for environmental measurements, *Energy Conversion and Management*, Volume 267, 2022, 115953, ISSN 0196-8904.
18. Akim V. Lavrinenko, Elena V. Ermolaeva, Maksim O. Frank, Kirill D. Ovchinnikov, Nikita V. Tryaskin. Selection of an autonomous unmanned surface vehicle body shape by using modern means of computational fluid dynamics. *Marine intellectual technologies. №4 (42) V.1 2018.* (in Russian).
19. Sonobot. Configuration options. *EvoLogics: website.* URL: <https://evologics.de/sonobotconfiguration-options> (accessed: 01.12.2021).
20. Kozhemyakin I. et al. Development of Autonomous Uninhabited Surface Gliders // *Proceedings of the Southern Federal University. Special Issue. Promising Systems and Control Problems.* 2013. No. 3(140). P. 31–39 (in Russian).
21. Kirill D. Ovchinnikov, Nikita V. Tryaskin, Akim V. Lavrinenko, Elena V. Ermolaeva, Maksim O. Frank. The Build Results of Small Unmanned Surface Vehicle Prototype. *Science Week of St. Petersburg State Maritime Technical University*, p.25, 2019 (in Russian).
22. Blue Robotics. URL: <https://bluerobotics.com/> (accessed: 05.12.2021).
23. Borisov R., Semenova V. *Ship Motion.* St. Petersburg: SMTU, 2015. 92 p. (in Russian).
24. Tkachenko I.V. *Sovremennye teorii turbulentsnosti [Modern turbulence theories].* Textbook. SMTU of SPb, SPb, 2010 (in Russian).
25. OpenFOAM. URL: <https://openfoam.org/> (дата использования: 05.12.2021).
26. Ovchinnikov K.D., Tryaskin N.V., Tkachenko I.V. Numerical simulation of motions of semisubmersible rig in regular waves. *Marine intellectual technologies, № 2 (28) V.1 2015.* (in Russian).

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

**Антон Валерьевич Митюшин**, студент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: [tokha.m.74@mail.ru](mailto:tokha.m.74@mail.ru)

**Михаил Александрович Мишарин**, студент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: [miwarin.m@mail.ru](mailto:miwarin.m@mail.ru)

**Андрей Иванович Палагута**, студент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: [andreykapalaguta22@gmail.com](mailto:andreykapalaguta22@gmail.com)

**Anton V. Mityushin**, student, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [tokha.m.74@mail.ru](mailto:tokha.m.74@mail.ru)

**Mikhail A. Misharin**, student, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [miwarin.m@mail.ru](mailto:miwarin.m@mail.ru)

**Andrey I. Palaguta**, student, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [andreykapalaguta22@gmail.com](mailto:andreykapalaguta22@gmail.com)

**Андрей Андреевич Сенишин**, аспирант ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: andrey24-95@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

**Andrey A. Sinishin**, PhD student, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: andrey24-95@mail.ru

**Kirill D. Ovchinnikov**, PhD (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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 03.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 05.10.2022.

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

Научная статья

УДК 629.5.015.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.002>

### Применение и сравнение различных методов вычисления предельных изгибающих моментов корпуса судна

В.А. Коршунов<sup>1</sup> [vovankorshunov@yandex.ru](mailto:vovankorshunov@yandex.ru), В.А. Манухин<sup>1</sup> [nikal6@mail.ru](mailto:nikal6@mail.ru),  
А.А. Родионов<sup>1</sup> [rodionovsmk@yandex.ru](mailto:rodionovsmk@yandex.ru)

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

**Аннотация.** Статья посвящена сравнению трех методов вычисления предельных изгибающих моментов корпусов судов: классического метода Ю.А. Шиманского; пошагово-итерационного метода согласно Общим правилам МАКО и метода конечных элементов (МКЭ). Расчеты выполнены для стального понтона упрощенной формы и конструкции при действии постоянного прогибающего момента в продольной вертикальной плоскости понтона. Величины предельного изгибающего момента, являющегося характеристикой общей несущей способности при прогибе и перегибе корпуса судна, используются в критерии предельной прочности и нормируются. Поэтому сравнение методов расчета и получаемых величин предельных моментов между собой весьма актуально. В статье для расчетов использованы, с одной стороны – расчетная процедура пошагово-итерационного метода, реализованная в СПбГМТУ в виде программного приложения Ultimate Strength (VB) для РМРС, а с другой – конечно-элементное моделирование в ANSYS. Показано, что все три метода приводят к близким результатам. Однако наименьшие значения предельного момента получаются в случае использования МКЭ. Проанализированы варианты конечно-элементной модели (КЭМ) с идентичной сеткой, приводящие к различным по виду предельным состояниям модели и соответствующим им значениям предельного момента.

**Ключевые слова:** предельный изгибающий момент, фибровая текучесть, редуцированная жесткость, пошагово-итерационный метод, кривизна оси, конечно-элементная модель.

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

**Для цитирования:** Коршунов В.А., Манухин В.А., Родионов А.А. Применение и сравнение различных методов вычисления предельных изгибающих моментов корпуса судна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 27—35.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.002>

### Application and comparison of various methods of calculation of ultimate bending moments of ship hull

Vladimir A. Korshunov<sup>1</sup> [vovankorshunov@yandex.ru](mailto:vovankorshunov@yandex.ru), Vadim A. Manukhin<sup>1</sup> [nikal6@mail.ru](mailto:nikal6@mail.ru),  
Aleksandr A. Rodionov<sup>1</sup> [rodionovsmk@yandex.ru](mailto:rodionovsmk@yandex.ru)

<sup>1</sup>State marine technical university of Saint-Petersburg, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article is devoted to comparing three methods of calculating the ultimate bending moments of ship hulls: the classical method of Yu. A. Shimansky; step-by-step iterative method according to the General Rules of IACS and Finite Element Method (FEM). Calculations are made for steel pontoon of simplified shape and structure under action of constant bending moment in longitudinal vertical plane of pontoon. The values of the ultimate bending moment, which is a characteristic of the total bearing capacity during deflection and inflection of the hull, are used in the ultimate strength criteria and are normalized. Therefore, the comparison of calculation methods and the obtained values of ultimate moments with each other is very important. The article uses for calculations, on the one hand, the calculation procedure of the step-by-step iteration method, implemented in St. Petersburg State Technical University in the form of the Ultimate Strength (VB) software application for RMRS, and on the other, finite element modeling in ANSYS. All three methods have been shown to produce similar results. However, the lowest values of the ultimate moment are obtained in the case of using FEM. Variants of finite element model with identical grid are analyzed, resulting in different ultimate states of model and corresponding values of ultimate bending moment.

**Key words:** ultimate bending moment, fiber fluidity, reduced stiffness, step-iterative method, curvature of axis, finite element model.

**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:** Vladimir A. Korshunov, Vadim A. Manukhin, Alexander A. Rodionov, Application and comparison of various methods of calculation of ultimate bending moments of ship hull, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 27—35.

### Введение

Корпус судна представляет собой сложную структуру, состоящую из оболочки (обшивки и настилов), подкрепленной балками и ребрами жесткости. Эта оболочка подвергается нагрузкам, обусловленным гравитацией и силами плавучести, вызывающими возникновение изгибающего момента и перерезывающей силы в вертикальной продольной плоскости судна. Кроме того, в штормовом море при значительной качке судно подвергается воздействию гидродинамических усилий и, как следствие, дополнительных волновых изгибающих и крутящего моментов и перерезывающих сил.

Наиболее важным для оценки прочности корпуса является вертикальный изгибающий момент, величина которого существенно больше горизонтального. Кроме того, ширина судна больше, чем его высота борта. Поэтому возникающие напряжения в элементах корпуса судна от вертикального изгиба оказываются наибольшими, особенно в средней его части.

Предельная прочность корпуса характеризуется предельными вертикальными изгибающими моментами в положении судна на вершине волны (ВВ) и на подошве волны (ПВ). Предельный момент представляет собой предельную нагрузку, при которой происходит разрушение конструкции из-за потери её структурной жесткости и прочности, вызванной:

- потерей устойчивости сжатых связей (рис. 1);
- пластической деформацией растянутых и сжатых связей.

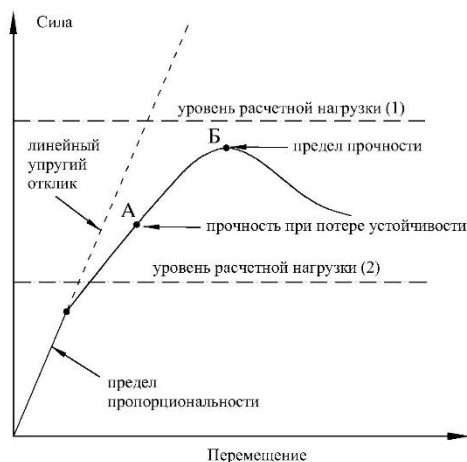


Рис. 1. Проектирование корпуса судна на основе предела прочности

На рис.1 точка А соответствует нагрузке, при которой происходит потеря устойчивости некоторых сжатых элементов корпуса судна. Точка Б соответствует предельной нагрузке, которую может выдержать корпус судна. Если при проектировании применяется расчетный уровень нагрузки 2, корпус будет в безопасности, но, если применяется уровень 1, возможно разрушение корпуса. Зная предельную нагрузку, можно оценить истинный запас прочности корпуса судна путем сравнения предельной нагрузки с расчетной. Чтобы получить безопасную и экономичную конструкцию корпуса судна, а также максимально возможную грузоподъемность, предельная нагрузка должна быть оценена

достаточно точно. Различные аспекты оценки предельных состояний корпусов судов приведены в [1-14]. Настоящая работа посвящена сравнению трех методов оценки предельных вертикальных изгибающих моментов корпуса судна.

### 1. Расчетная модель

Предельные вертикальные изгибающие моменты вычислялись для понтона упрощенной формы и конструкции, изображенного на рис. 2.

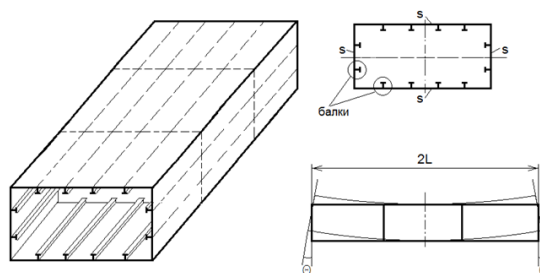


Рис. 2. Понтон упрощенной формы и конструкции

Понтон с размерениями: 7,2 x 3,0 x 1,5 (в метрах) состоит из трех отсеков длиной  $a=2,4$  м. Материал – сталь с пределом текучести  $\sigma_t=315$  МПа и модулем нормальной упругости  $E=206$  ГПа. Толщина обшивки  $s=6$  мм, продольная шпация по палубе и днищу  $b_1=0,6$  м, по борту  $b_2=0,5$  м, профиль продольных балок – тавр 200x6/100x12 мм.

В силу симметрии понтона относительно горизонтальной плоскости, ограничимся вычислением прогибающего момента.

### 2. Традиционный метод

В отечественной судостроительной практике оценка предельных изгибающих моментов производится методом последовательных приближений акад. Ю.А. Шиманского [1-3].

В нулевом приближении характеристики расчетного поперечного сечения корпуса судна, а именно: положение нейтральной оси  $e_0$ , момент инерции  $I_0$  и момент сопротивления верхней палубы  $W_0$  определяются без учета возможной потери устойчивости сжатых в предельном состоянии продольных связей. Для оценки устойчивости связей и вычисления их редуционных коэффициентов в  $j$ -м приближении используется табл. 1, шапка которой показана ниже.

Таблица 1

Расчет редуционных коэффициентов

| № связи | Наименование $i$ -й связи | $\sigma_{кр i}$ , МПа | $j$ -е приближение |                |                           |                 |                          |    |  |
|---------|---------------------------|-----------------------|--------------------|----------------|---------------------------|-----------------|--------------------------|----|--|
|         |                           |                       | $z_{i ВВ}$ , м     | $z_{i ПВ}$ , м | Предельные напряжения МПа |                 | Редуционные коэффициенты |    |  |
|         |                           |                       |                    |                | $\sigma_{i ВВ}$           | $\sigma_{i ПВ}$ | ВВ                       | ПВ |  |
| 1       | 2                         | 3                     | 4                  | 5              | 6                         | 7               | 8                        | 9  |  |
|         |                           |                       |                    |                |                           |                 |                          |    |  |

В первую и вторую колонки табл. 1 заносят все продольные связи расчетного сечения корпуса, в

третью - критические напряжения связей, в четвертую и пятую - отстояние центров тяжести связей от нейтральной оси, а в шестую и седьмую - нормальные напряжения в связях, соответствующие предельному состоянию корпуса при перегибе и прогибе, вычисляемые по формулам:

$$\sigma_i^{BB} = -\frac{z_i^{BB}}{H - e^{BB}} \cdot \sigma_t; \quad \sigma_i^{PB} = +\frac{z_i^{PB}}{H - e^{PB}} \cdot \sigma_t, \quad (1)$$

где  $H$  - высота борта в расчетном сечении;  $e^{BB(PB)}$  - отстояние нейтральной оси расчетного поперечного сечения корпуса от основной плоскости.

В колонки 8 и 9 заносят редуцированные коэффициенты только для сжатых связей, в которых сжимающие предельные напряжения превышают критические. Их вычисляют по формулам:

$$\varphi_i^{BB} = \frac{\sigma_i^{KP}}{|\sigma_{BBi}^{KP}|}; \quad \varphi_i^{PB} = \frac{\sigma_i^{KP}}{|\sigma_{PBi}^{KP}|}. \quad (2)$$

Для всех связей, теряющих устойчивость, отдельно для перегиба и прогиба судна вычисляют их редуцируемые площади  $A_{ред}$  и поправки к ним:

$$\Delta A_i^{BB} = A_i^{ред}(\varphi_i^{BB} - 1); \quad \Delta A_i^{PB} = A_i^{ред}(\varphi_i^{PB} - 1). \quad (3)$$

С учетом поправок (3) к характеристикам расчетного поперечного сечения нулевого приближения вычисляются те же характеристики в  $j$ -м приближении -  $e_j$ ,  $I_j$  и  $W_j$  на ВВ и на ПВ соответственно.

По вычисленным в итоге последовательных приближений с заданной точностью моментам сопротивления верхней палубы находят предельные изгибающие моменты для перегиба и прогиба корпуса по формулам

$$M_{пред}^{BB} = \sigma_t \cdot W_t^{BB}; \quad M_{пред}^{PB} = \sigma_t \cdot W_t^{PB}. \quad (4)$$

Одношаговый метод расчета предельных изгибающих моментов, регламентированный Правилами РМРС [4,5] и Общими правилами МАКО [6-8], представляет собой реализацию 1-го приближения традиционного метода Ю.А. Шиманского. Оба метода представляют собой упрощенный расчет, основанный на редуцировании изгибной жесткости эквивалентного бруса.

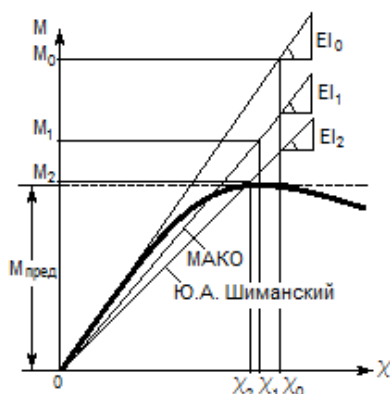


Рис. 3. Зависимость «момент – кривизна оси эквивалентного бруса» при прогибе

Предельные моменты могут быть найдены и по формулам

$$M_{пред}^{BB} = (EI)_{ред}^{BB} \cdot \chi_{пред}^{BB}; \quad M_{пред}^{PB} = (EI)_{ред}^{PB} \cdot \chi_{пред}^{PB}, \quad (5)$$

где  $(EI)_{ред}$ ,  $\chi_{пред} = \frac{\sigma_t}{E \cdot (H - e_{пред})}$  - редуцированная изгибная жесткость и кривизна оси эквивалентного бруса в предельном состоянии на ВВ и на ПВ соответственно.

Уменьшение жесткости эквивалентного бруса  $EI_0$  вызвано возможной потерей устойчивости сжатых продольных элементов корпуса, таких как листы обшивки и настилов, продольные ребра жесткости и балки. Из рис.3 видно, что при прочих равных условиях методика Ю.А. Шиманского дает более точное значение предельного момента за счет последовательного уточнения редуцированных коэффициентов.

Для рассматриваемого понтона вычисления приводят к результатам, сведенным в табл. 2.

Таблица 2  
Результаты расчета предельных моментов

| Характеристика                   | Номер приближения |          |          |
|----------------------------------|-------------------|----------|----------|
|                                  | 0                 | 1        | 2        |
| $\varphi_{п}$                    | 1                 | 0,2364   | 0,2364   |
| $\varphi_{б}$                    | 1                 | 0,5107   | 0,4874   |
| $e$ , м                          | 0,75              | 0,6709   | 0,6704   |
| $I_{yy}$ , м <sup>4</sup>        | 0,03109           | 0,02636  | 0,2633   |
| $W_t$ , м <sup>3</sup>           | 0,04145           | 0,03179  | 0,03174  |
| $C_{пред}$ , м <sup>-1</sup>     | 0,002039          | 0,001844 | 0,001843 |
| $(EI)_{ред}$ , кН·м <sup>2</sup> | 6404460           | 5430330  | 5425200  |
| $M_{пред}$ , кН·м                | 13057             | 10015    | 10000    |

В табл.2 приведены редуцированные коэффициенты для листов палубы  $\varphi_{п}$  и крайних листов борта  $\varphi_{б}$ , показывающие, что эти продольные связи в предельном состоянии при прогибе на ПВ теряют устойчивость. Эйлерово напряжение листов вычислено по известной формуле для шарнирно опертой по всем кромкам пластины, равномерно сжатой вдоль длинной стороны [1-3]. Эти напряжения по отношению к пределу текучести материала составляют 0,24 и 0,34 для палубы и борта соответственно, поэтому такими же будут и критические напряжения пластин. Отметим, что при отношении сторон пластин палубы  $\gamma = a/b_1 = 4,0$  в них при потере устойчивости вдоль длинной стороны образуется четыре полуволны, а в верхних пластинах борта при  $\gamma = a/b_2 = 4,8$  - пять полуволн. Проверка общей продольной и боковой устойчивости балок и их элементов (свободного пояса и стенки) показала, что их устойчивость обеспечивается вплоть до предельных сжимающих напряжений равных пределу текучести материала.

### 3. Пошагово-итерационный метод

Согласно Правилам [4-8] проверка предельной прочности должна выполняться для танкеров с двойным корпусом длиной 150 м и более и для навалочных судов с двойными или одинарными бортами длиной 90 м и более. Причем размеры продольных связей корпуса судна назначаются с учетом половины надбавки на коррозионный износ.

Предельная прочность корпуса судна характеризуется предельным изгибающим моментом, который определяется как для состояния прогиба (sagging condition), так и для перегиба (hogging condition) корпуса. Требование к предельной

прочности корпуса судна в Общих правилах МАКО представлено в следующем виде:

$$\frac{M_U}{\gamma_R} \geq \gamma_S M_{SW-U} + \gamma_W M_{WW}, \quad (6)$$

где  $M_U$  - предельный изгибающий момент корпуса судна;  $M_{SW-U}$  - изгибающий момент на тихой воде в рассматриваемом сечении по длине средней части судна;  $M_{WW}$  - волновой изгибающий момент в рассматриваемом сечении по длине средней части;  $\gamma_R, \gamma_S, \gamma_W$  - коэффициенты безопасности.

Расчетная процедура позволяет получить графическую зависимость изгибающего момента в расчетном поперечном сечении корпуса от кривизны его нейтральной оси для случаев прогиба и перегиба судна, показанную на рис. 4. Экстремальные точки на кривой определяют значения предельного изгибающего момента для прогиба и перегиба корпуса соответственно.

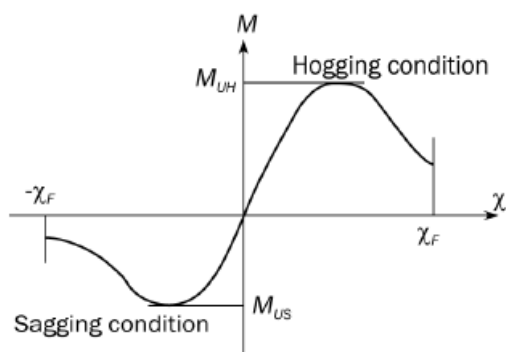


Рис. 4. Зависимость  $M(\chi)$

Величина кривизны нейтральной оси корпуса определяется по следующей формуле:

$$\chi = \frac{\theta}{l}, \quad (7)$$

где  $\theta$  - относительный угол поворота двух соседних поперечных сечений, находящихся на расстоянии  $l$ , равном шапции рамного набора.

Согласно Правилам, предельные моменты могут быть вычислены одношаговой или пошагово-итерационной процедурой. В качестве альтернативы рекомендуется использовать МКЭ в нелинейной постановке.

Пошагово-итерационный метод реализует вычисление вертикального изгибающего момента при прогибе и перегибе судна в расчетном поперечном сечении корпуса в зависимости от кривизны нейтральной оси эквивалентного бруса в этом сечении.

Алгоритм построения зависимости  $M(\chi)$ , блок-схема которого показана на рис. 5, носит итерационный характер и приведен ниже.

1. Поперечное сечение корпуса судна разделяется на отдельные элементы: продольные балки основного набора с примыкающей к ним обшивкой, «жесткие углы» и поперечно подкрепленные листовые элементы.

2. Определяется шаг изменения кривизны для пошагово-итерационной процедуры, при котором в связях верхней палубы изменение напряжения составляет 1% от предела текучести материала.

3. Для всех элементов определяются относительная деформация и нормальное напряжение, соответствующие значению кривизны и положению нейтральной оси. Начальное положение нейтральной оси определяется из линейного расчета эквивалентного бруса в упругой области. Напряжения в элементах вычисляются с учетом возможных пластических деформаций и различных видов потери устойчивости. Для каждого типа элементов в Правилах указаны опасные состояния и приведены соответствующие выражения для определения критического напряжения.

4. Определяется новое положение нейтральной оси из условия равенства нулю общего продольного усилия в расчетном сечении корпуса. Изменение положения нейтральной оси приводит к необходимости повторить п.3, пока ее смещение не станет меньше допустимой точности.

5. Для данного равновесного состояния вычисляется значение изгибающего момента.

6. Увеличивается значение кривизны и пп. 3-5 повторяются. Критерием остановки расчета является достижение величиной изгибающего момента максимальной величины.

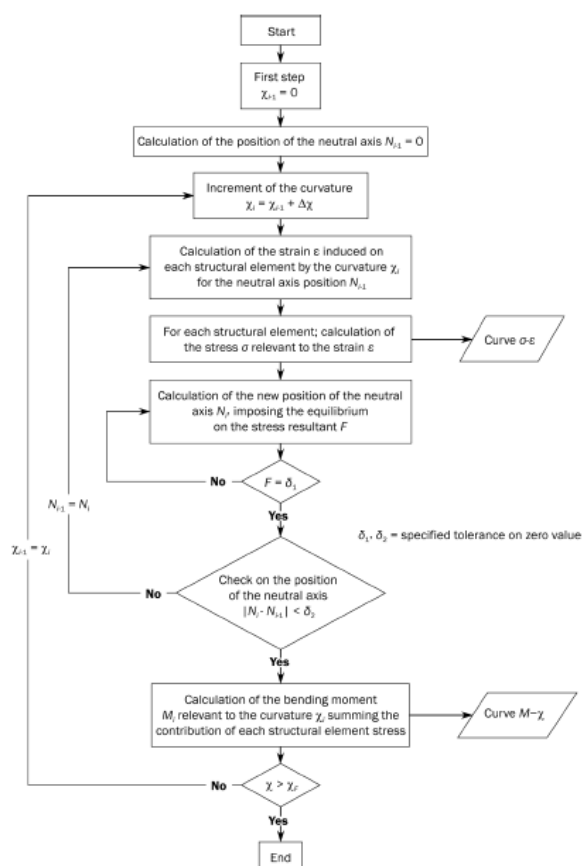


Рис. 5. Алгоритм вычисления зависимости  $M(\chi)$  по правилам МАКО

Рассмотренный выше алгоритм реализован в СПбГМТУ в виде программного приложения Ultimate Strength (VB) для РМРС, модули которого написаны на языке Visual Basic 6.0 [9]. Исходная информация включает в себя четыре текстовых файла. В первом приводятся общие характеристики корпуса, а

именно: предел текучести материала, момент инерции и моменты сопротивления палубы и днища поперечного сечения в нулевом приближении, аппликата нейтральной оси. Во втором файле описываются продольные балки основного набора с примыкающей к ним обшивкой, в третьем – так называемые «жесткие углы» и в четвертом – поперечно подкрепленные листовые элементы. В выходном текстовом файле для каждого значения кривизны оси корпуса в расчетном сечении приводятся величина вертикального изгибающего момента и аппликата нейтральной оси от основной плоскости.

Программное обеспечение протестировано на расчете предельных изгибающих моментов для танкеров типа «VLCC» и «Владивосток» и балкера типа «CAPESIZE» и показало хорошие результаты [10-12].

Применительно к поперечному сечению рассматриваемого понтона были составлены три заполненных файла исходных данных и один пустой, т.к. поперечно подкрепленные панели в понтоне отсутствуют. Сечение понтона было разбито на четыре «жестких угла» и 12 балок продольного набора. Результаты расчета показаны графически на рис. 6.

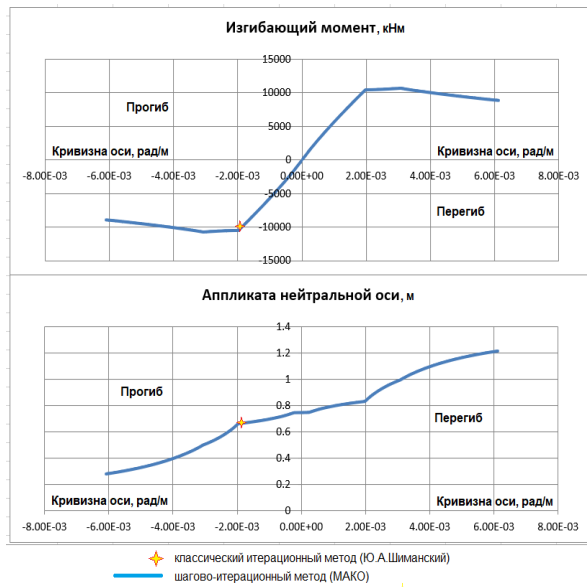


Рис.6. Зависимость  $M(\chi)$  для понтона, полученная по программному модулю Ultimate Strength (VB)

Из рис. 6 видно, что предельный момент при прогибе и при перегибе понтона составляет  $\pm 10490$  кН·м при кривизне оси  $\pm 0,00198$  рад/м. Аппликата нейтральной оси при прогибе понтона равна 0,665 м, при перегибе 0,835 м.

#### 4. Метод конечных элементов

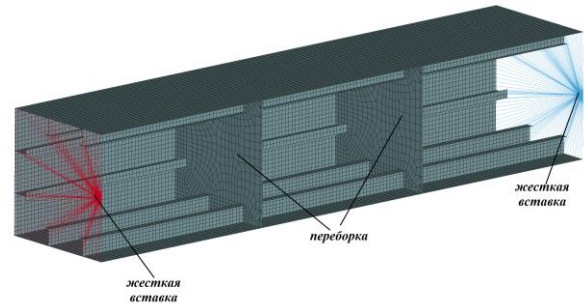
В двух предыдущих методах результаты расчетов получились практически идентичными. Это связано с использованием в них балочной модели корпуса и схожими допущениями, такими как неучет взаимодействия элементов поперечного сечения между собой, гипотеза плоских сечений. Вместе с тем, эти результаты следует рассматривать как приближенные, что связано опять же с рядом допущений. Например, в методе Ю.А. Шиманского

площадь поперечного сечения потерявших устойчивость пластин разделяется на «жесткую» и «гибкую» (редуцируемую) связи, а напряжения в этих связях осредняются по ширине связи. Не учитывается взаимодействие пластин палубы и борта между собой при потере ими устойчивости с различным числом полуволн вдоль длинных смежных кромок. В пошагово-итерационном методе используются приближенные зависимости критических напряжений от деформаций продольных связей. В обоих методах не учитывается полное взаимодействие пластин и балок набора друг с другом.

Отказаться от большей части допущений описанных выше подходов позволяют процедуры МКЭ, реализующие подробную пространственно-временную дискретизацию процесса деформирования конструкции с явной схемой интегрирования по времени. При этом возможно дополнительное учет нелинейного поведения материалов, возникновения больших деформаций, особенностей контактного взаимодействия и т. д.

Для выполнения численного расчета разработана трех-отсечная КЭМ исследуемого понтона (рис. 7). Рассмотрено два варианта модели: без учета шпангоутов и с их учетом. В модель явным образом включены наружная обшивка, продольные балки и шпангоуты, переборки учтены условно в виде плоских стенок. Все конструктивные элементы выполнены в оболочечной идеализации с минимальным размером конечного элемента 50 мм. На оконечностях модели установлены жесткие вставки, шарнирно соединенные с элементами конструкции. Учтено упругопластическое поведение материала в виде билинейной диаграммы деформирования с пределом текучести  $\sigma_t = 315$  МПа и модулем упругости 1000 МПа.

а)



б)

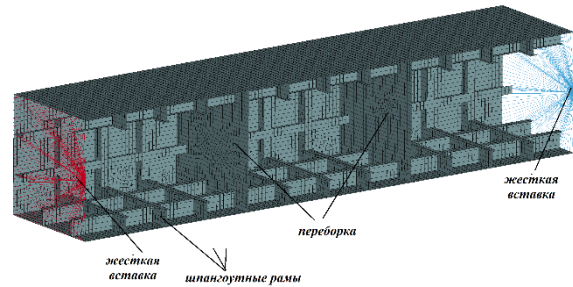


Рис.7. КЭМ понтона (сечение по ДП): а – без учета шпангоутных рам; б – с учетом рам

Для определения значения предельного изгибающего момента в модели реализован процесс

жесткого нагружения. Для этого к жестким вставкам прикладывается угловое перемещение до тех пор, пока модель не начнет терять несущую способность. Далее для жестких вставок на каждом шаге интегрирования определяется реактивное усилие в виде изгибающего момента и кривизна оси, по полученным данным строится зависимость  $M(\chi)$ .

На рис. 8 показано поле суммарных перемещений в момент потери устойчивости обшивки для первого варианта понтона. Из результатов хорошо видно, что форма потери устойчивости пластины обшивки, ограниченной по ширине продольными балками, а по длине поперечными переборками включает пять полуовал, что не соответствует аналитическому решению для свободно-опертой пластины.

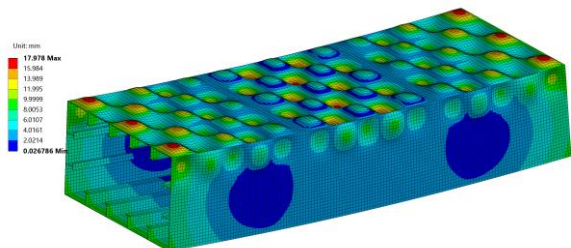


Рис. 8. Поле суммарных перемещений при потере устойчивости обшивки

Потеря несущей способности понтона быстро прогрессирует с началом локальной потерей устойчивости продольных балок (рис. 9).

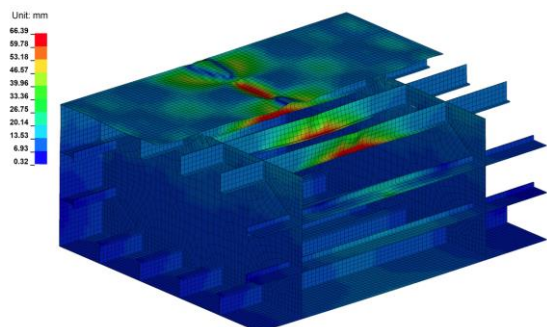


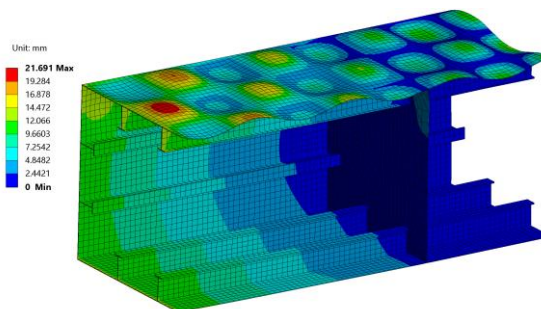
Рис. 9. Поле суммарных перемещений после потери несущей способности связей

Как видно, полученные выше формы деформирования и потери несущей способности обладают симметрией относительно диаметральной плоскости и плоскости миделя, что позволяет для уменьшения вычислительных ресурсов использовать 1/4 модели с условиями симметрии на границах с отброшенными частями.

Для обоснования несоответствия формы потери устойчивости пластин палубы аналитическому решению в КЭМ внесены следующие изменения: соединение продольных балок с наружной обшивкой выполнено с помощью контактного алгоритма, с опцией шарнирного соединения обшивки и стенок балок. Данная корректировка выполнена для исключения влияния упругой заделки пластин на балках на форму потери устойчивости. Расчет с использованием контактного алгоритма, выполнен для 1/4 части модели. Формы потери устойчивости пластин для двух вариантов их соединения с ребрами показаны на рис. 10. Здесь видно, что число полуовал потери устойчивости при шарнирном

соединении пластин равно четырем, что соответствует аналитическому решению. Полученные результаты подтверждают предположение о влиянии упругой заделки пластин на форму потери устойчивости. Однако, как будет показано ниже, данное обстоятельство практически не оказывает влияние на значение предельного изгибающего момента.

а)



б)

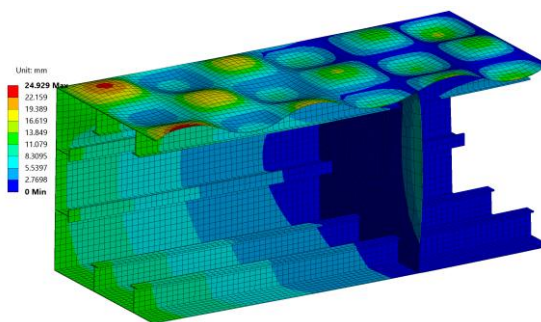


Рис. 10. Форма потери устойчивости настила палубы: а – с учетом упругой заделки на продольных балках; б – без учета заделки

Для определения влияния конструктивных особенностей реального корпуса на величину предельного изгибающего момента выполнен расчет модели понтона с учетом шпангоутных рам. На рис. 11 показана форма потери устойчивости обшивки, которая соответствует четырем полуовалам в пределах одного отсека.

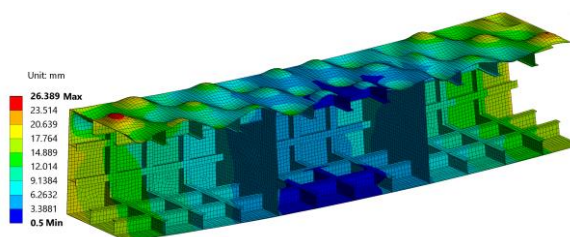


Рис. 11. Поле суммарных перемещений при потере устойчивости обшивки с учетом поперечных связей

Для рассмотренных выше расчетных случаев кривые  $M(\chi)$ , показаны на рис. 12. Как видно, поведение всех моделей в линейной области полностью совпадает. Несущественные различия в пределах 5% наблюдаются при начале потери устойчивости элементов обшивки. Наибольшую жесткость и соответственно наибольший предельный изгибающий момент показала модель с учетом шпангоутных рам,

наименьшее значение наблюдается для четверти модели с наложенными условиями симметрии.

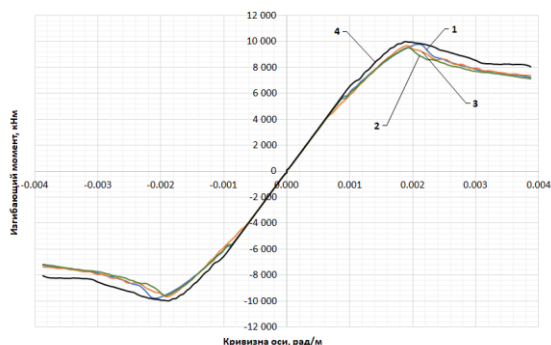


Рис. 12. Зависимость  $M(x)$  для понтона, полученная по МКЭ:

1 – трехотсечная модель понтона; 2 – 1/4 модель понтона без учета упругой заделки пластин на ребрах; 3 – 1/4 модель понтона без учета упругой заделки пластин на ребрах; 4 – трехотсечная модель понтона со шпангоутами

### 5. Сравнение полученных результатов и выводы

Числовые значения предельных изгибающих моментов, вычисленные по рассмотренным в настоящей работе методам, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Предельные изгибающие моменты понтона

| Метод расчета                  |        | $M_{пред}$ , кН·м |
|--------------------------------|--------|-------------------|
| Ю.А. Шиманский                 |        | 10000             |
| Пошагово-итерационный метод    |        | 10490             |
| МКЭ<br>(см. подпись к рис. 12) | вар. 1 | 9780              |
|                                | вар. 2 | 9540              |
|                                | вар. 3 | 9660              |
|                                | вар. 4 | 10000             |

Из представленных данных видно совпадение результатов метода Ю.А. Шиманского и конечно-элементного расчета модели с учетом поперечных рамных связей (вар. 4). В КЭМ без шпангоутных рам (вар. 1-3), как видно из рис. 9, происходит локальная потеря устойчивости продольных балок, которая не может быть учтена ни в методе Ю.А. Шиманского, ни в пошагово-итерационном методе. Поэтому эти варианты КЭМ, результаты по которым различаются между собой всего на 2-2,5%, приводят к меньшим на 2,2-4,6% значениям предельного изгибающего момента по сравнению с КЭМ с рамными

поперечными связями (вар. 4), устраняющими локальную неустойчивость продольных балок.

Предельный изгибающий момент, вычисленный пошагово-итерационным методом, оказался на 5% больше его значений по методу Ю.А. Шиманского и по МКЭ (вар. 4). Возможно, причиной здесь может быть условное разделение продольных связей корпуса на продольные балки с примыкающей к ним обшивкой и на «жесткие углы». Поскольку «жесткие углы» по определению могут разрушаться только в результате пластических деформаций, устойчивость составляющих их листов обшивки в пошагово-итерационном методе не анализируется. Однако для рассматриваемого понтона с одинаковой толщиной листов смежные пластины палубы и борта устойчивость теряют, и их площадь поперечного сечения редуцируется. Наличие двух сжатых «жестких углов» понтона уменьшают редуцируемую площадь теряющих устойчивость пластин палубы и борта на 27,5% и повышает предельный изгибающий момент.

По полученным в работе результатам расчета понтона можно сделать следующие выводы.

1. Метод Ю.А. Шиманского, пошагово-итерационный метод и МКЭ дают весьма близкие значения предельного изгибающего момента, попадающие в диапазон 9540-10490 кН·м.

2. Конечно-элементный расчет приводит в общем случае к наименьшему значению предельного изгибающего момента, т.к. позволяет избежать допущений приближенных методов и выявить недоступные им механизмы потери несущей способности конструкции.

3. При наличии плоскостей симметрии корпуса в МКЭ можно моделировать и рассчитывать только симметричную часть с условиями симметрии на ее границах.

4. Если предельная прочность определяется устойчивостью пластин обшивки, сжатых вдоль длинной стороны контура, то возможное различие закритической формы их равновесия слабо влияет на величину предельного момента. Это связано с тем, что критическая нагрузка таких пластин практически не зависит от числа полуволн формы потери устойчивости.

5. Пошагово-итерационный метод приводит к наибольшему значению предельного изгибающего момента.

6. Метод Ю.А. Шиманского, несмотря на простоту алгоритма и возможность «ручного счета», приводит к результатам, сопоставимым по точности с МКЭ и пошагово-итерационным методом.

### Литература

1. Короткин Я.И. Прочность корабля. Л. Судостроение, 1974, 432 с.
2. Манухин В.А. Прочность корабля. Конспект лекций. СПбГМТУ, 2011, 239 с.
3. Манухин В.А., Родионов А.А., Упырев В.М. Проверочные расчеты общей прочности судна. Учебное пособие. СПбГМТУ, 2012, 115 с.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Т.4. Ч.XVII. Общие правила по конструкции и прочности нефтеналивных судов с двойными бортами. РМРС, 2006
5. Правила классификации и постройки морских судов. Т.4. Ч.XVIII. Общие правила по конструкции и прочности навалочных судов. РМРС, 2006
6. Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers. IACS, 2006
7. Common Structural Rules for Bulk Carriers. IACS, 2006
8. Common Structural Rules. IACS, 2012

9. Манухин В.А., Тряскин В.Н. Программное обеспечение расчетов предельной прочности транспортных судов по Правилам МАКО. Тез. докл. конф. по строит. механике корабля, посвящ. памяти проф. П.Ф. Папковича 23-24 дек. 2015 г. С.-Петербург, ФГУП КГНЦ им. акад. А.Н. Крылова, 2015, с. 35-36
10. Манухин В.А., Тряскин В.Н. Сравнительный анализ расчетов предельной прочности танкеров и навалочных судов. Морские интеллектуальные технологии, № 2(32), Т.1, СПб, изд. «НИЦ МОРИНТЕХ», 2016, с. 9-13
11. Манухин В.А., Зин Мин Хтет. Сравнение традиционного и пошагово-итерационного методов вычисления предельных моментов корпуса судна. Морские интеллектуальные технологии, № 2(32), Т.1, СПб, изд. «НИЦ МОРИНТЕХ», 2016, с. 20-26
12. Манухин В.А., Зин Мин Хтет. Вычисление предельных изгибающих моментов корпуса судна. Учебное пособие. LAP LAMBERT Academic Publishing RU, Saarbrücken, 2017, 105 с.
13. Jeom Kee Paik, Ge Wang, Bong Ju Kim, Anil Kumar Thayamballi. Ultimate Limit State Design of Ship Hulls. For presentation at the 2002 SNAME annual meeting. Boston, 2002, 24 p.
14. Ozguc, Ozgur and Barltrop, Nigel. Analysis on the hull girder ultimate strength of a bulk carrier using simplified method based on an incremental-iterative approach. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 130(2), 2008, 27 p.

#### References

1. Korotkin Y.I. Prochnost' korablya [Ship's strength]. L, izd. «Sudostroenie», 1974, 432 s.
2. Manukhin V.A. Prochnost' korablya. Konspekt lektsiy [Ship's strength. Lecture summary]. SPbGMTU, 2011, 239 s.
3. Manukhin V.A., Rodionov A.A., Upyrev V.M. Proverochnye raschety obshchey prochnosti sudna. Uchebnoe posobie [Verification calculations of the total strength of the vessel. Tutorial]. SPbGMTU, 2012, 115 s.
4. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. T.4. Ch.XVII. Obshchie pravila po konstruksii i prochnosti neftenalivnykh sudov s dvoynymi bortami [Rules for the classification and construction of sea vessels. T.4. Ch. XVII. General Rules for the Design and Strength of Double-Sided Oil Loading Vessels]. RMRS, 2006
5. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. T.4. Ch.XVIII. Obshie pravila po konstruksii i prochnosti navalochnykh sudov [Rules for the classification and construction of sea vessels. T.4. Ch. XVIII. General rules on the design and strength of bulk vessels]. RMRS, 2006
6. Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers. IACS, 2006
7. Common Structural Rules for Bulk Carriers. IACS, 2006
8. Common Structural Rules. IACS, 2012
9. Manukhin V.A., Tryaskin V.N. Programmnoe obespechenie raschetov predel'noy prochnosti transportnykh sudov po Pravilam MAKO [Software for calculating the ultimate strength of transport vessels according to the Rules of the IACS]. Тез. докл. конф. по строит. механике корабля, посвящ. памяти проф. П.Ф. Папковича 23-24 дек. 2015 г. С.-Петербург, ФГУП КГНЦ им. акад. А.Н. Крылова, 2015, с. 35-36
10. Manukhin V.A., Tryaskin V.N. Sravnitel'nyi analiz raschetov predel'noi prochnosti tankerov i navalochnykh sudov [Comparative analysis of calculations of ultimate strength of tankers and bulk vessels]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 2(32), Т.1, СПб, изд. «НИЦ МОРИНТЕХ», 2016, с. 9-13
11. Manukhin V.A., Zin Min Khtet. Sravnenie traditsionnogo i poshagovo-iteratsionnogo metodov vychisleniya predel'nykh momentov korpusa sudna [Comparison of traditional and step-by-step iterative methods for calculating ship hull ultimate moments]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 2(32), Т.1, СПб, изд. «НИЦ МОРИНТЕХ», 2016, с. 20-26
12. Manukhin V.A., Zin Min Khtet. Vychislenie predel'nykh izgibayshikh momentov korpusa sudna [Calculation of ultimate bending moments of the vessel hull. Tutorial]. LAP LAMBERT Academic Publishing RU, Saarbrücken, 2017, 105 s.
13. Jeom Kee Paik, Ge Wang, Bong Ju Kim, Anil Kumar Thayamballi (2002). Ultimate Limit State Design of Ship Hulls. For presentation at the 2002 SNAME annual meeting. Boston, 2002, 24 p.
14. Ozguc, Ozgur and Barltrop, Nigel (2008). Analysis on the hull girder ultimate strength of a bulk carrier using simplified method based on an incremental-iterative approach. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 130(2), 2008, 27 p.

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

**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: vovankorshunov@yandex.ru

**Vladimir A. Korshunov**, Ph.D. (Eng), Associate professor at the Department of ship structural mechanics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: vovankorshunov@yandex.ru

**Вадим Анатольевич Манухин**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikal6@mail.ru

**Vadim A. Manukhin**, Ph.D. (Eng), Associate professor, Associate professor at the Department of ship structural mechanics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nikal6@mail.ru

**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

**Aleksandr A. Rodionov**, Dr.Sci.(Eng), Professor, the head of the Department of ship structural mechanics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.08.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.09.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 30.10.2022.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.003>

## Определение амплитуд вторых гармоник нелинейной качки судна на регулярном волнении

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 суммарных нелинейных сил и соответствующих амплитуд второго порядка различных видов качки на основании применения трехмерной потенциальной теории. Проведена оценка влияния отдельных составляющих нелинейных сил в суммарном силовом воздействии на судно. Выполнено сравнение расчетов амплитудно-частотных характеристик второго порядка с расчетами по различным двумерным методам. Показано хорошее согласование результатов между собой в большинстве случаев. Показано, что влияние нелинейных сил приводит к появлению супергармонических резонансных режимов вертикальной, бортовой и килевой качки, имеющих место в зоне частот в два раза меньших соответствующих собственных частот. Приведены результаты расчетов амплитуд вторых гармоник на различных курсовых углах. Показано, что наибольшее влияние нелинейные факторы имеют место при расположении судна лагом. Приведены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик поперечных видов качки с учетом нелинейных факторов. Показано их значительное влияние в зоне низких частот.

**Ключевые слова:** трехмерная потенциальная теория, функция Грина, нелинейные силы второго порядка, амплитуды вторых гармоник, супергармонические резонансы

**Для цитирования:** Семенова В.Ю., Альбаев Д.А., Определение амплитуд вторых гармоник нелинейной качки судна на регулярном волнении, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 36—44.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.003>

## Determination of the amplitudes of the second harmonics of the non-linear motions of a ship in regular waves

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 determination of the total nonlinear forces and the corresponding amplitudes of the second order of various types of motions based on the application of three-dimensional potential theory. An assessment of the influence of individual components of nonlinear forces in the total force effect on the ship was carried out. The calculations of the amplitude-frequency characteristics of the second order are compared with the calculations by various two-dimensional methods. Good agreement between the results was shown in most cases. It is shown that the influence of non-linear forces leads to the appearance of superharmonic resonant modes of heave, roll and pitch modes of motions occurring in the frequency zone twice as low as the corresponding natural frequencies. The results of calculations of the amplitudes of the second harmonics at different heading angles are presented. It is shown that the greatest influence of non-linear factors takes place during the motions in beam waves. The results of calculations of the amplitude-frequency characteristics of transverse types of motions are given, taking into account non-linear factors. Their significant influence in the low frequency zone is shown.

**Keywords:** three-dimensional potential theory, Green's function, nonlinear forces of the second order, second harmonic amplitudes, superharmonic resonances

**For citation:** Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev, Determination of the amplitudes of the second harmonics of the non-linear motions of a ship in regular waves, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 36—44.

### Введение

Конечной целью расчетов нелинейной качки является определение соответствующих амплитуд, вызываемых действием нелинейных сил. В работах Paraniolao [12] и Kuzuka [11] было проведено определение амплитуд второго порядка поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки для U-образного шпангоутного контура. В работах Семеновой В.Ю. [2], Со Чжо Ту [10] проводится определение амплитуд вторых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной, бортовой и других видов качки судна на основании двумерных методов. В работе [2] рассматривается случай бесконечно-

глубокой жидкости, в работе [10] - качка в условиях мелководья. В работе Paraniolao [13] приведены результаты расчетов амплитуд вторых гармоник продольно-горизонтальной, вертикальной и килевой качки для прямоугольной баржи. Задача была решена на основании трехмерного метода. Во всех перечисленных работах было отмечено появление супергармонических резонансных режимов бортовой и вертикальной качки.

В настоящей работе рассматривается определение амплитуд вторых гармоник качки, возникающих от воздействия нелинейных сил второго порядка на основании трехмерной потенциальной теории для различных типов судов.

**Описание метода**

В работах авторов [4], [5], [6], [7], [8], [9] были последовательно определены четыре категории нелинейных сил второго порядка : в работах [4], [5], [6] – нелинейные силы, возникающие при изолированных видах колебаний: поперечно-горизонтальной, вертикальной , бортовой и других  $F_{Y22}^{(2)}, F_{Y44}^{(2)}, F_{Z22}^{(2)}, F_{Z44}^{(2)}, F_{Z33}^{(2)}, M_{X22}^{(2)}, M_{X44}^{(2)}$  в работе [7] – нелинейные силы, обусловленные взаимодействием дифракции и набегающего волнения  $F_{Y77}^{(2)}, F_{Z77}^{(2)}, M_{X77}^{(2)}$  в работе [8] – нелинейные силы, обусловленные взаимодействием волнения и отдельных видов колебаний  $F_{Y27}^{(2)}, F_{Y47}^{(2)}, F_{Z27}^{(2)}, F_{Z47}^{(2)}, F_{Z37}^{(2)}, M_{X27}^{(2)}, M_{X47}^{(2)}, M_{X37}^{(2)}$ , в работе [9] – нелинейные силы, обусловленные взаимодействием отдельных видов колебаний  $F_{Y23}^{(2)}, F_{Y34}^{(2)}, F_{Z24}^{(2)}, M_{X23}^{(2)}, M_{X34}^{(2)}$ .

Суммарные нелинейные силы и моменты, действующие на судно при его расположении лагом к набегающему волнению определяются в виде суперпозиции всех перечисленных сил [2], [10]:

$$F_{Y\Sigma}^{(2)} = F_{Y22}^{(2)} + F_{Y44}^{(2)} + F_{Y23}^{(2)} + F_{Y34}^{(2)} + F_{Y77}^{(2)} + F_{Y27}^{(2)} + F_{Y47}^{(2)} + F_{Y37}^{(2)}; \tag{1}$$

$$F_{Z\Sigma}^{(2)} = F_{Z22}^{(2)} + F_{Z44}^{(2)} + F_{Z33}^{(2)} + F_{Z24}^{(2)} + F_{Z77}^{(2)} + F_{Z27}^{(2)} + F_{Z47}^{(2)} + F_{Z37}^{(2)};$$

$$M_{X\Sigma}^{(2)} = M_{X22}^{(2)} + M_{X44}^{(2)} + M_{X23}^{(2)} + M_{X34}^{(2)} + M_{X77}^{(2)} + M_{X27}^{(2)} + M_{X37}^{(2)} + M_{X47}^{(2)}.$$

С другой стороны, эти же силы могут быть определены на основании трехмерной потенциальной теории с общими граничными условиями на смоченной и свободной поверхностях:

$$\frac{d\Phi^{(2)}}{dn} = -\frac{i}{2}n(\bar{\chi}^{(1)} \cdot \nabla)\nabla\Phi^{(1)} + \frac{i}{2}(V^{(1)} - \nabla\Phi^{(1)})N^{(1)}, \tag{2}$$

где

$$\bar{\chi}^{(1)} = \left\{ \begin{matrix} \xi_g^{(1)} + (\psi_m^{(1)}z - \chi_m^{(1)}y) \\ \eta_g^{(1)} - (\theta_m^{(1)}z - \chi_m^{(1)}x) \\ \zeta_g^{(1)} + (\theta_m^{(1)}y - \psi_m^{(1)}x) \end{matrix} \right\};$$

$$N^{(1)} = \left\{ \begin{matrix} \psi^{(1)}\cos(n,z) - \chi^{(1)}\cos(n,y) \\ -\theta^{(1)}\cos(n,z) + \chi^{(1)}\cos(n,x) \\ \theta^{(1)}\cos(n,y) - \psi^{(1)}\cos(n,x) \end{matrix} \right\} \tag{3}$$

$$V^{(1)} = \left\{ \begin{matrix} \xi_g^{(1)} + (\psi^{(1)}z - \chi^{(1)}y) \\ \eta_g^{(1)} - (\theta^{(1)}z - \chi^{(1)}x) \\ \zeta_g^{(1)} + (\theta^{(1)}y - \psi^{(1)}x) \end{matrix} \right\};$$

$$n = \left\{ \begin{matrix} \cos(n,x) \\ \cos(n,y) \\ \cos(n,z) \end{matrix} \right\}.$$

Для определения потенциалов второго порядка  $\Phi^{(2)}$  используется метод интегральных уравнений, согласно которому:

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

$$= -\frac{1}{4\pi}\iint_{\Omega}\frac{d\Phi^{(2)}}{dn}G^{(2)}d\Omega + \frac{1}{4\pi}\iint_{S_F}Q_F G^{(2)}dS_F.$$

Функция Грина  $G^{(2)}$  определяется для случаев бесконечно-глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины при  $H/T$ , стремящейся к бесконечности согласно работам [4], [7], [8].

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

Система дифференциальных уравнений нелинейной качки с учетом найденных сил второго порядка имеет вид:

$$\left\{ \begin{matrix} (M + \lambda_{11}^{(2)})\ddot{\xi}_g^{(2)} + \lambda_{13}^{(2)}\dot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{15}^{(2)}\ddot{\psi}^{(2)} + \mu_{11}^{(2)}\dot{\xi}_g^{(2)} + \mu_{13}^{(2)}\dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{15}^{(2)}\dot{\psi}^{(2)} = F_X^{(2)}e^{-i2\omega_k t}; \\ (M + \lambda_{22}^{(2)})\ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{24}^{(2)}\ddot{\theta}^{(2)} + \lambda_{26}^{(2)}\dot{\chi}^{(2)} + \mu_{22}^{(2)}\dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{24}^{(2)}\dot{\theta}^{(2)} + \mu_{26}^{(2)}\dot{\chi}^{(2)} = F_Y^{(2)}e^{-i2\omega_k t}; \\ (M + \lambda_{33}^{(2)})\ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{31}^{(2)}\dot{\xi}_g^{(2)} + \lambda_{35}^{(2)}\ddot{\psi}^{(2)} + \mu_{33}^{(2)}\dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{31}^{(2)}\dot{\xi}_g^{(2)} + \mu_{35}^{(2)}\dot{\psi}^{(2)} + \rho g S \zeta_g^{(2)} - \rho g S X_f \psi^{(2)} = F_Z^{(2)}e^{-i2\omega_k t}; \\ (J_{xx} + \lambda_{44}^{(2)})\ddot{\theta}^{(2)} + \lambda_{42}^{(2)}\dot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{46}^{(2)}\dot{\chi}^{(2)} + \mu_{44}^{(2)}\dot{\theta}^{(2)} + \mu_{42}^{(2)}\dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{46}^{(2)}\dot{\chi}^{(2)} + Dh_0\theta^{(2)} = M_x^{(2)}e^{-i2\omega_k t}; \\ (J_{yy} + \lambda_{55}^{(2)})\ddot{\psi}^{(2)} + \lambda_{51}^{(2)}\dot{\xi}_g^{(2)} + \lambda_{53}^{(2)}\dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{55}^{(2)}\dot{\psi}^{(2)} + \mu_{51}^{(2)}\dot{\xi}_g^{(2)} + \mu_{53}^{(2)}\dot{\zeta}_g^{(2)} + DH_0\psi^{(2)} - \rho g S X_f \zeta_g^{(2)} = M_y^{(2)}e^{-i2\omega_k t}; \\ (J_{zz} + \lambda_{66}^{(2)})\dot{\chi}^{(2)} + \lambda_{62}^{(2)}\dot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{64}^{(2)}\dot{\theta}^{(2)} + \mu_{66}^{(2)}\dot{\chi}^{(2)} + \mu_{62}^{(2)}\dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{64}^{(2)}\dot{\theta}^{(2)} = M_z^{(2)}e^{-i\omega_k t}. \end{matrix} \right. \tag{5}$$

Коэффициенты присоединенных масс и демпфирования второго порядка определяются на основании работы авторов [3]. Решение системы, в соответствии с правой частью, имеет вид:

$$\left\{ \begin{matrix} \xi_g^{(2)} = \xi_{g0}^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_{\xi}^{(2)}); \\ \eta_g^{(2)} = \eta_{g0}^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_{\eta}^{(2)}); \\ \zeta_g^{(2)} = \zeta_{g0}^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_{\zeta}^{(2)}); \\ \theta^{(2)} = \theta_0^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_{\theta}^{(2)}); \\ \psi^{(2)} = \psi_0^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_{\psi}^{(2)}); \\ \chi^{(2)} = \chi_0^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_{\chi}^{(2)}). \end{matrix} \right. \tag{6}$$

Дважды дифференцируя выражения (7), подставляя найденные производные в систему (6) и приравнявая коэффициенты при соответствующих функциях времени, получим алгебраическую систему уравнений относительно неизвестных амплитуд второго порядка продольно-горизонтальной качки  $\xi_g^{(2)}$ , поперечно-горизонтальной  $\eta_g^{(2)}$ , вертикальной  $\zeta_g^{(2)}$ , килевой  $\psi^{(2)}$ , бортовой  $\theta^{(2)}$  и рысканья  $\chi^{(2)}$ .

**Анализ результатов**

На основании изложенного была разработана программа, реализующая определение суммарных нелинейных сил и моментов и амплитуд вторых гармоник качки.

Расчеты нелинейных сил и моментов, проводились для пяти различных типов судов. В таблице 1 приведены основные характеристики данных судов.

Таблица 1

Таблица основных характеристик судов

| Тип/ Название судна          | L   | B    | T    | $\delta$ | $\alpha$ |
|------------------------------|-----|------|------|----------|----------|
| Лихтеровоз "Алексей Косыгин" | 232 | 32   | 10.6 | 0.57     | 0.82     |
| Балкер "Капитан Панфилов"    | 134 | 20.6 | 9.4  | 0.78     | 0.88     |
| Лесовоз "Николай Новиков"    | 140 | 21   | 8.68 | 0.74     | 0.83     |
| Сухогруз "Новгород"          | 138 | 20.6 | 9    | 0.68     | 0.79     |
| Танкер                       | 310 | 47.2 | 18.9 | 0.85     | 0.9      |

На рисунках 1 – 3 приведены результаты расчетов суммарных нелинейных сил и моментов, действующих на суда при расположении лагом. Расчеты проводились на основании двух разработанных программ и представлены в сравнении с расчетами суммарных нелинейных сил и моментов, полученных на основании двумерных методов [2], [10].

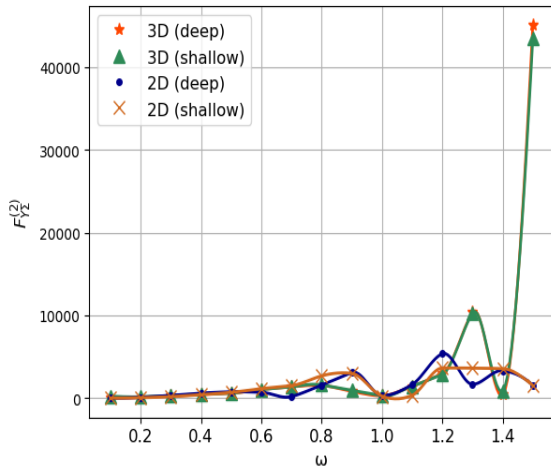


Рис. 1. Суммарная горизонтальная нелинейная сила для лесовоза "Николай Новиков". Сравнение методов.

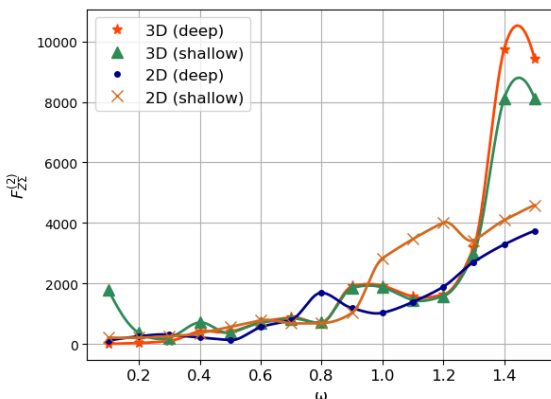


Рис. 2. Суммарная вертикальная нелинейная сила для сухогруза "Новгород". Сравнение методов.

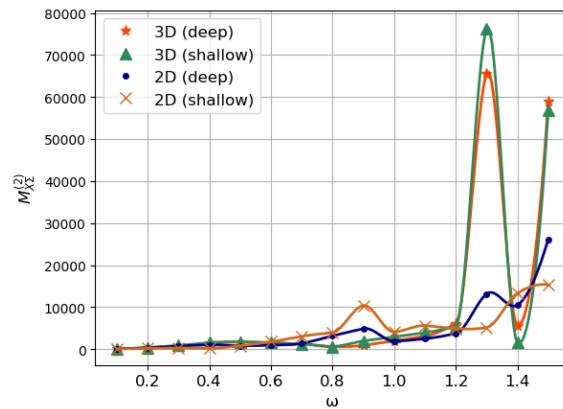


Рис. 3. Суммарный нелинейный момент для балкера "Капитан Панфилов". Сравнение методов.

Из приведенных для разных судов результатов видно хорошее согласование результатов, полученных разными методами, особенно в зоне частот  $\omega < 1$ .

В работе был проведен анализ влияния отдельных нелинейных составляющих из выражения (1) на суммарные силы. Характерные результаты приведены для танкера на рис. 4 – 6.

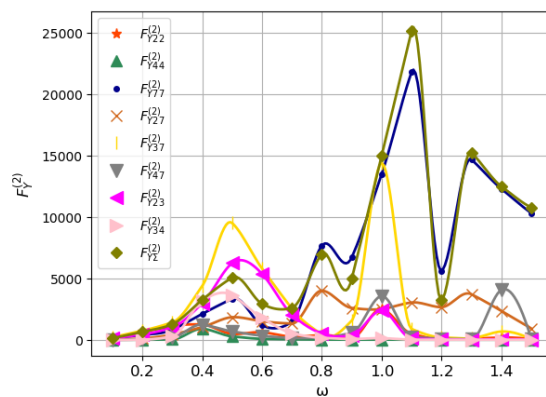


Рис. 4. Сравнение отдельных составляющих нелинейной горизонтальной силы для танкера.

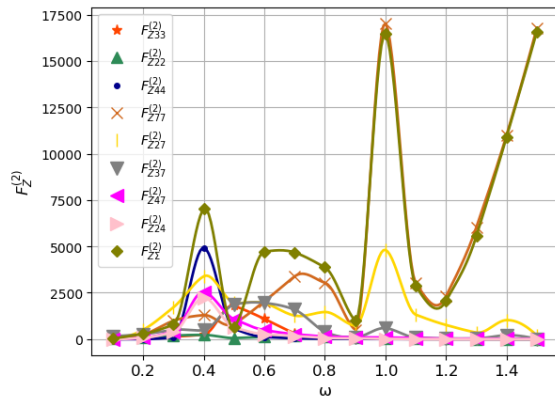


Рис. 5. Сравнение отдельных составляющих нелинейной вертикальной силы для танкера.

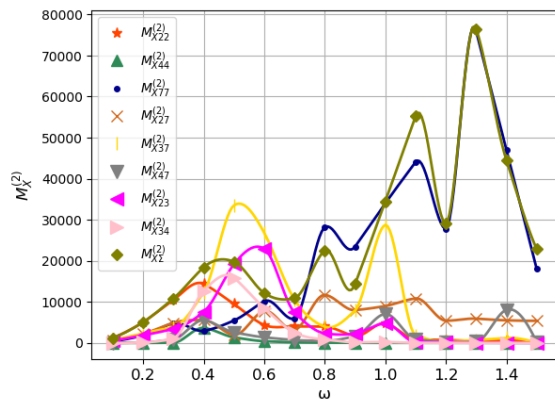


Рис. 6. Сравнение отдельных составляющих нелинейного момента для танкера.

Из представленных результатов видно, что в зоне частот  $\omega < 1$  все составляющие нелинейных сил и моментов имеют равнозначное влияние. В области частот  $\omega > 1$ , суммарные нелинейные силы и моменты обусловлены преимущественно дифракционными составляющими  $F_{Y77}, F_{Z77}, M_{X77}$ . Остальные составляющие нелинейных сил и моментов в связи своей зависимости от амплитуд первых гармоник, в этой зоне частот стремятся к нулю (рис. 4 – 6).

На рис. 7 – 12 представлены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик вторых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки. Расчеты проводились по двум вышеупомянутым программам в сравнении с расчетами по двумерной теории на основании интегральных методов [10], а также комбинированного метода [2]. Амплитуды вторых гармоник представлены в следующем виде:

$$\frac{\eta_g^{(2)} B}{2a_w^2}, \frac{\zeta_g^{(2)} B}{2a_w^2}, \frac{\theta^{(2)} B^2}{4a_w^2}, \text{ где } a_w \text{ - амплитуда волны.}$$

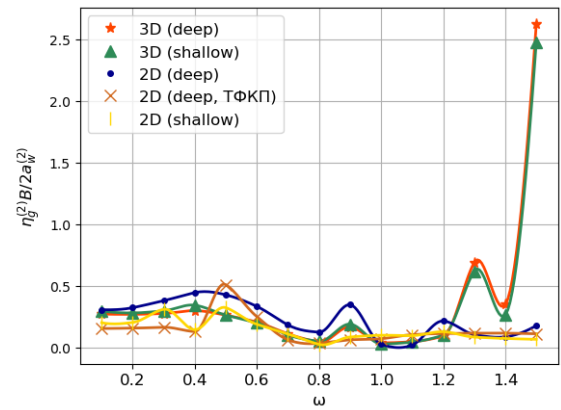


Рис. 7. АЧХ поперечно-горизонтальной качки второго порядка для сухогруза «Новгород». Сравнение методов.

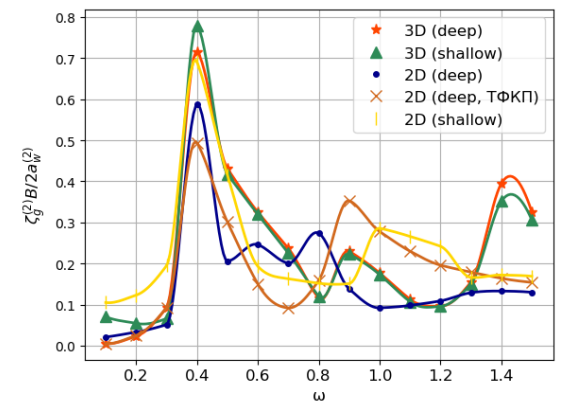


Рис. 8. АЧХ вертикальной качки второго порядка для сухогруза «Новгород». Сравнение методов.

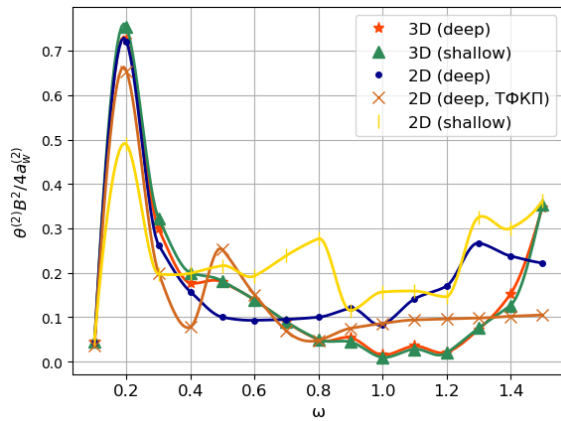


Рис. 9. АЧХ бортовой качки второго порядка для сухогруза «Новгород». Сравнение методов.

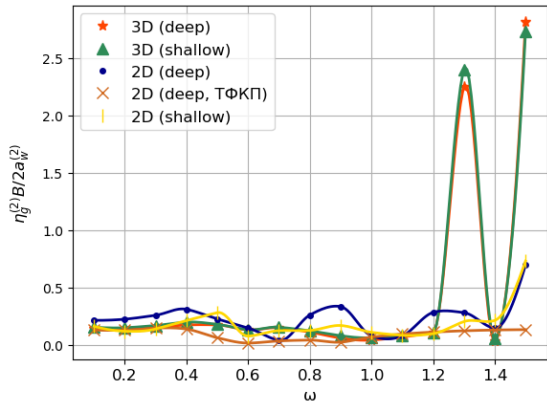


Рис. 10. АЧХ поперечно-горизонтальной качки второго порядка для балкера «Капитан Панфилов». Сравнение методов.

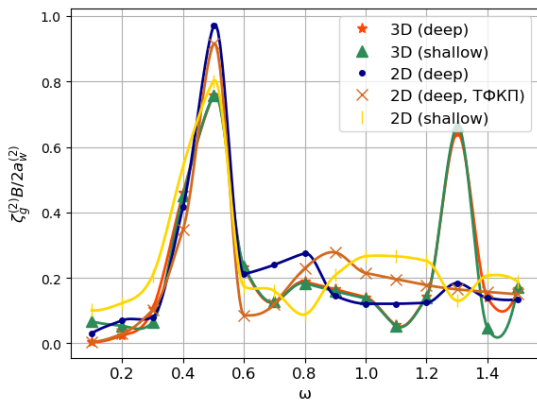


Рис. 11. АЧХ вертикальной качки второго порядка для балкера «Капитан Панфилов». Сравнение методов.

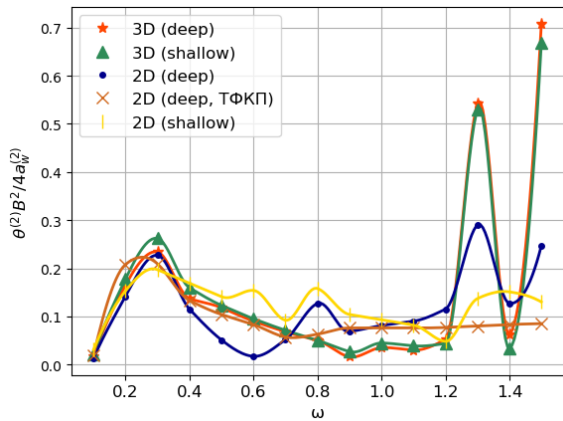


Рис. 12. АЧХ бортовой качки второго порядка для балкера «Капитан Панфилов». Сравнение методов.

Результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик вторых гармоник, полученные по двум разработанным программам полностью совпадают между собой. И хорошо согласуются с результатами

расчетов по двумерным методам, особенно в зоне частот  $\omega < 0.75$ .

Для амплитудно-частотных характеристик вторых гармоник вертикальной и бортовой качки характерно наличие супергармонических резонансных режимов, происходящих на частотах в два раза меньших собственных частот вертикальной и бортовой качки (рис. 8, 9, 11, 12). Например, резонанс вертикальной качки сухогруза «Новгород» имеет место на частоте  $\omega = 0.4$  (рис. 8), а бортовой на частоте  $\omega = 0.2$  (рис. 9). Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник поперечно-горизонтальной качки могут иметь вторичные резонансы, обусловленные влиянием основных резонансов вертикальной и бортовой качки (рис. 7, 10).

В работе были проведены расчеты амплитудно-частотных характеристик вторых гармоник на произвольных курсовых углах. На рис. 13 – 17 представлены результаты расчетов амплитуд вторых гармоник продольно-горизонтальной качки, поперечно-горизонтальной, вертикальной, бортовой и килевой для лихтеровоза «Алексей Косыгин» для курсовых углов 90, 135 и 180 градусов.

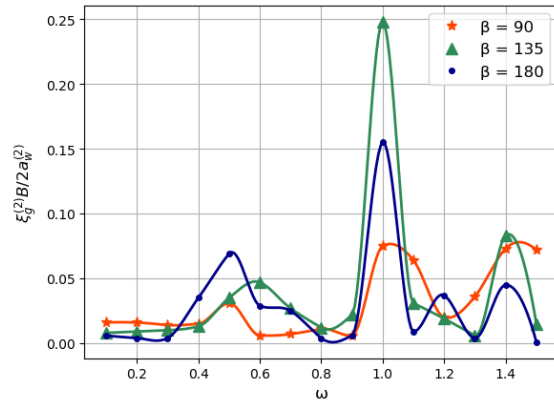


Рис. 13. АЧХ продольно-горизонтальной качки лихтеровоза «Алексей Косыгин» в зависимости от курсовых углов.

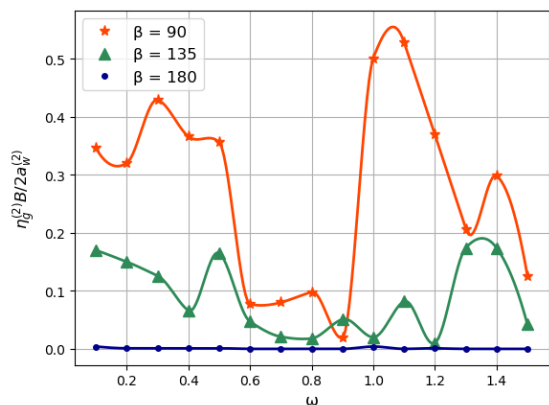


Рис. 14. АЧХ поперечно-горизонтальной качки лихтеровоза «Алексей Косыгин» в зависимости от курсовых углов.

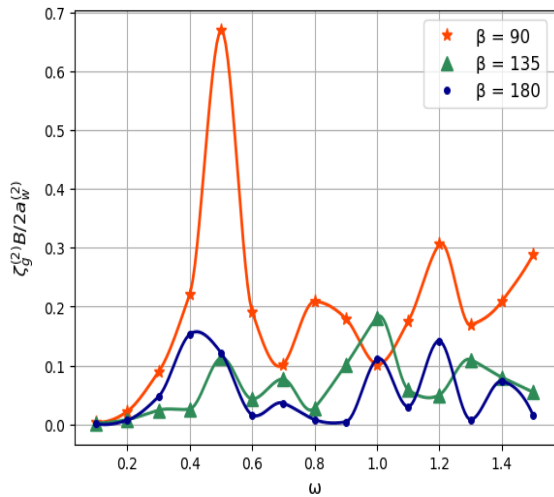


Рис. 15. АЧХ вертикальной качки лихтеровоза "Алексей Косыгин" в зависимости от курсовых углов.

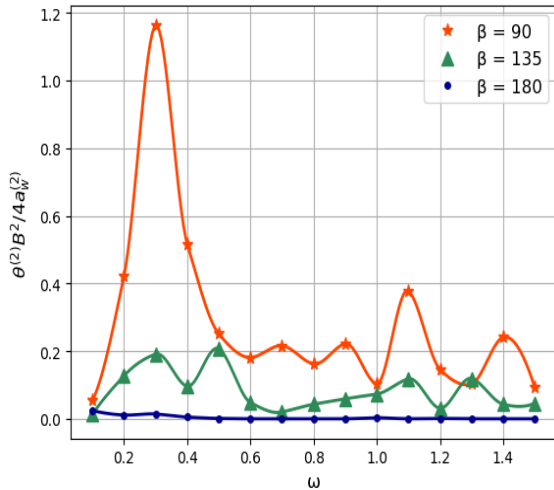


Рис. 16. АЧХ бортовой качки лихтеровоза "Алексей Косыгин" в зависимости от курсовых углов.

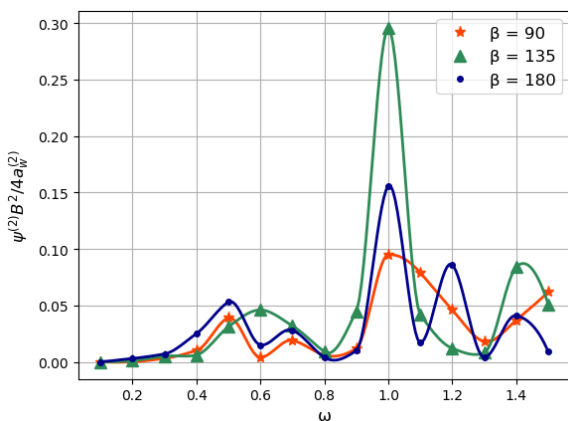


Рис. 17. АЧХ килевой качки лихтеровоза "Алексей Косыгин" в зависимости от курсовых углов.

Видно, что наибольшие амплитуды поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки имеют место для случая 90 градусов. Так, в зоне резонанса амплитуда второй гармоники бортовой качки для 90 градусов больше соответствующей

амплитуды при 135 градусах в 5 раз (рис. 16), а амплитуда вертикальной в 7 раз (рис. 15).

В случае продольно-горизонтальной и килевой качки, наоборот, наибольшие амплитуды вторых гармоник имеют место на встречном волнении. Резонанс продольно-горизонтальной качки, имеющий место на частоте  $\omega = 0.5$  является вторичным и обусловлен влиянием вертикальной и килевой качки (рис. 13, 15, 17). Резонанс, имеющий место на частоте  $\omega = 1$  также, не является истинным резонансом, а обусловлен влиянием основных резонансных режимов.

Согласно теории нелинейных колебаний [1] амплитудно-частотные характеристики отдельных видов качки с учетом амплитуд вторых гармоник определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\eta_g^\Sigma}{a_w} &= \frac{\eta_g^{(1)}}{a_w} + \varepsilon_2 \frac{\eta_g^{(2)}}{a_w}; \\ \frac{\zeta_g^\Sigma}{a_w} &= \frac{\zeta_g^{(1)}}{a_w} + \varepsilon_3 \frac{\zeta_g^{(2)}}{a_w}; \\ \frac{\theta^\Sigma}{\alpha_0} &= \frac{\theta^{(1)}}{\alpha_0} + \varepsilon_4 \frac{\theta^{(2)}}{\alpha_0}; \\ \frac{\psi^\Sigma}{\alpha_0} &= \frac{\psi^{(1)}}{\alpha_0} + \varepsilon_5 \frac{\psi^{(2)}}{\alpha_0}; \\ \frac{\chi^\Sigma}{\alpha_0} &= \frac{\chi^{(1)}}{\alpha_0} + \varepsilon_6 \frac{\chi^{(2)}}{\alpha_0}. \end{aligned} \tag{7}$$

На рис. 18 – 20 представлены сравнения амплитудно-частотных характеристик первого порядка, полученных по линейной теории и суммарных амплитудно-частотных характеристик для разных судов. Амплитудно-частотные характеристики представлены в безразмерном виде в соответствии с формулами (8).

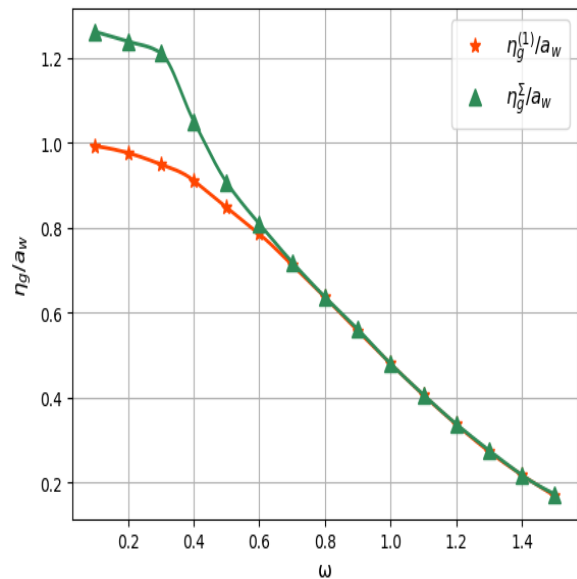


Рис. 18. АЧХ поперечно-горизонтальной качки сухогруза "Новгород".

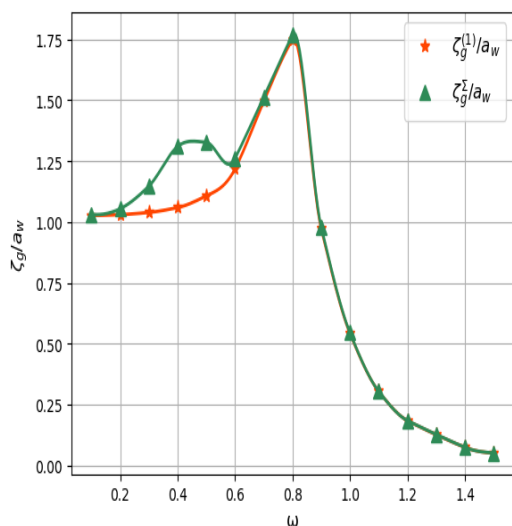


Рис. 19. АЧХ вертикальной качки балкера “Капитан Панфилов”.

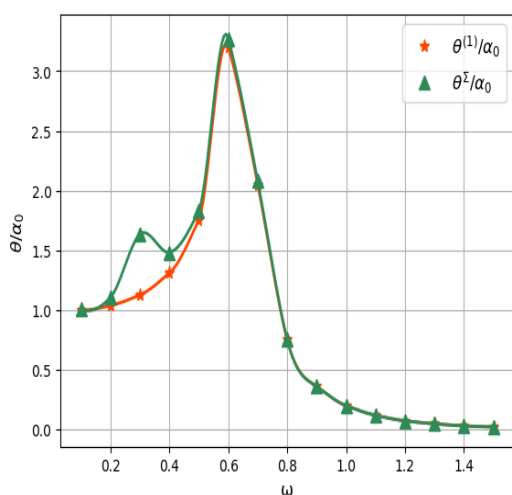


Рис. 20. АЧХ бортовой качки лесовоза “Николай Новиков”.

Из представленных результатов видно, что основное влияние нелинейных факторов второго порядка имеет место в зоне низких частот  $\omega < 0.5$  (рис. 18, 19, 20). В случае поперечно-горизонтальной качки для всех рассчитанных судов оно не превышает 25% (рис.18). В случае вертикальной качки наибольшее влияние нелинейных факторов имеет место в зоне супергармонического резонанса и может достигать, в зависимости от судна, от 10 до 50%(рис.19). В случае бортовой качки основное влияние нелинейных сил также имеет место в зоне супергармонического резонанса и в ряде случаев может быть больше 50%. В зоне частот  $\omega < 1$  суммарные амплитудно-частотные характеристики полностью совпадают с линейными.

### Заключение

В статье на основании ранее опубликованных работ произведено определение полных нелинейных сил, действующих на разные суда, проведена оценка влияния отдельных нелинейных составляющих в суммарном силовом воздействии на судно и выполнены расчеты амплитуд вторых гармоник различных видов качки. Анализ полученных результатов показал наличие супергармонических резонансных режимов вертикальной и бортовой качки в которых влияние нелинейных эффектов достигает своего максимального значения. Наибольшие амплитуды вторых гармоник имеют место при расположении судна лагом.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при расчете ускорений в различных точках судна и в расчетах нелинейной качки на нерегулярном волнении.

### Литература

1. Бондарь Н.Г. Нелинейные стационарные колебания. Изд. Наукова думка. Киев, 1974
2. Семенова В. Ю. (2005) Разработка метода расчета нелинейной качки судов //Дисс. на соиск. уч. степени д. т. н. Библиотека СПбГМТУ.
3. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2019). Определение инерционно-демпфирующих сил второго порядка малости, возникающих при качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории //Морские интеллектуальные технологии, № 2(44), Т.1 2019 стр. 36-44
4. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2019) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при вертикальной качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 4-1 (40). С. 63-69.
5. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2020) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях судов на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 2-2 (48). С. 11-18.
6. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А (2020) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при продольной качке судна Морские интеллектуальные технологии № 3 том 1, Стр.31-40
7. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2021) Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории. Морские интеллектуальные технологии, N2, т.3. С.20-28
8. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2021) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна. Морские интеллектуальные технологии. № 4, т.2. С. 21-31.

9. 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
10. Со Чжо Ту (2014) Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье: дис. – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
11. Kyozuka Y. Experimental Study on Second-Order Forces acting on cylindrical body in waves. Proc. of the 14th Symp. on Naval Hydrodynamics, Ann Arbor, 1982, pp.319-382.
12. 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
13. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N (1993), Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, N 6, с.165-185.

#### References

1. Bondar' N.G. Nelineynyye statsionarnyye kolebaniya. [Nonlinear stationary oscillations] Izd. Naukova dumka. Kiyev, 1974
2. Semenova V. YU. (2005) Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov sudov [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships] //Diss. na soisk. uch. stepeni d. t. n. Biblioteka SPBGMTU.
3. Semenova V.YU., Al'bayev D.A. (2019). Opredeleniye inertsiionno-dempfiruyushchikh sil vtorogo poryadka malosti, vznikayushchikh pri kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsial'noy teorii [ Determination of the second order inertial-damping forces arising during the oscillations of the ship based on the three-dimensional potential theory] //Morskiye intellektual'n-yye tekhnologii, № 2(44), T.1 2019 str. 36-44.
4. Semenova V.YU., Al'bayev D.A. (2019) Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri vertikal'noy kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsial'noy teorii. [Determination of nonlinear forces of the second order arising during the heaving of a ship, based on three-dimensional potential theory] Morskiye intellektual'n-yye tekhnologii. № 4-1 (40). S. 63-69.
5. Semenova V.YU., Al'bayev D.A. (2020) Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri poperechno-gorizontal'nykh i bortovykh kolebaniyakh sudov na osnovanii trekhmernoy potentsial'noy teorii. Morskiye intellektual'n-yye tekhnologii. [Determination of nonlinear second-order forces arising from horizontal and rolling motions of ships based on three-dimensional potential theory] № 2-2 (48). S. 11-18.
6. Semenova V.YU., Al'bayev D.A (2020) Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri prodol'noy kachke sudna [The determination of nonlinear forces of the second order during the longitudinal motions of the ship] Morskiye intellektual'n-yye tekhnologii № 3 tom 1, Str.31-40.
7. Semenova V.YU., Al'bayev D.A. (2021) Opredeleniye nelineynykh difraktsionnykh sil vtorogo poryadka, deystvuyushchikh na sudno, na osnovanii trekhmernoy teorii. [ The determination of nonlinear second-order diffraction forces acting on a ship based on three-dimensional theory]. Morskiye intellektual'n-yye tekhnologii, N2, t3. S.20-28.
8. Semenova V.YU., Al'bayev D.A. (2021) Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri vzaimodeystvii volneniya i otdel'nykh vidov kachki sudna. [Determination of nonlinear forces of the second order arising from the interaction of waves and certain types of ship's motions] Morskiye intellektual'n-yye tekhnologii. № 4, t.2. S. 21-31.
9. Semenova V.YU., Al'bayev D.A. (2022) Chislennoye opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri vzaimodeystvii ot del'nykh vidov kachki sudna na regul'yarnom volnenii. [Numerical determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of certain types of ship's motions in regular waves] Morskiye intellektual'n-yye tekhnologii. № 2, chast' 2. S. 125-133.
10. So Chzho Tu (2014) Razrabotka metoda rascheta nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri kachke sudna na melkovod'ye [Development of a method for calculating nonlinear second-order forces arising during the motions of a ship in shallow water]. Dis. – Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy morskoy tekhnicheskyy universitet.
11. Kyozuka Y. Experimental Study on Second-Order Forces acting on cylindrical body in waves. Proc. of the 14th Symp. on Naval Hydrodynamics, Ann Arbor, 1982, pp.319-382.
12. 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.
13. 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, s.165-185.

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

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

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

**Данил Айдарович Альбаев**, старший преподаватель кафедры теории корабля, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: albaevdanil@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: albaevdanil@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 26.10.2022.

Научная статья

УДК 629.5.015.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.004>

## Оценка влияния сопротивления воды при моделировании динамического процесса столкновения судов

А.А. Родионов<sup>1</sup> rodionovsmk@yandex.ru, Е.А. Карпенко<sup>1</sup> evgeniakappenko@gmail.com,  
Д.А. Пономарев<sup>1</sup> ponomarev.smk@corp.smtu.ru

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

**Аннотация.** В данной статье анализируется процесс динамического столкновения судов. Приведены результаты расчетов модельных задач на основе метода конечных элементов (МКЭ) и метода конечных разностей (МКР), где анализируется процесс абсолютно неупругого торцевого удара таранящего судна в середину изначально неподвижного таранимого судна. Приближенные модели судов построены на основе одномерной теории балок и стержней. Продемонстрировано изменение прогиба балочной модели таранимого судна с учетом сопротивления забортной воды. Влияние сопротивления забортной воды учитывается как присоединенная масса модели таранимого судна. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния балочной и стержневой модели в динамическом процессе столкновения. 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, метод конечных элементов, конечно-разностный метод, сопротивление воды, контактная зона удара, упругопластический материал, закон линейного упрочнения.

**Благодарности:** Настоящее исследование выполнено в рамках государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ № 075-03-2020-094/1 от 10.06.2020.

**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., Пономарев Д.А. Оценка влияния сопротивления воды при моделировании динамического процесса столкновения судов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 45—50.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.004>

## Evaluation of the effect of water resistance in simulation of the dynamic process of ship collision

Aleksandr A. Rodionov<sup>1</sup> rodionovsmk@yandex.ru, Evgenia A. Karpenko<sup>1</sup> evgeniakappenko@gmail.com,  
Dmitry A. Ponomarev<sup>1</sup> ponomarev.smk@corp.smtu.ru

<sup>1</sup>State marine technical university of Saint-Petersburg, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** This article analyzes the process of dynamic collision of ships. The results of calculations of model problems based on the finite element method (FEM) and the finite difference method (FDM) are presented, where the process of an absolutely inelastic end impact of a ramming vessel into the middle of an initially immobile ramming vessel is analyzed. Approximate ship models are based on the one-dimensional theory of beams and rods. The change in the deflection of the beam model of a ramming vessel is demonstrated, taking into account the resistance of outboard water. The effect of seawater resistance is taken into account as the added mass of the ramming vessel model. An assessment of the stress-strain state of the beam and rod models in the dynamic process of collision has been carried out. Calculations are given for a material obeying the law of linear hardening for the case of uniaxial tension, using the plastic flow diagram, taking into account the unloading of the material.

**Keywords:** ship collision, dynamic collision process, finite element method, finite difference method, water resistance, impact contact zone, elastoplastic material, linear hardening law.

**Acknowledgments:**

**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, Evgenia A. Karpenko, Dmitry A. Ponomarev, Evaluation of the effect of water resistance in simulation of the dynamic process of ship collision, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 45—50.

### Введение

Процесс столкновения судов включает в себя целый комплекс задач, исследуемых в таких научных дисциплинах как: теоретическая механика, теория

корабля, теоретическая гидромеханика, строительная механика корабля, механика разрушения. Каждая из этих дисциплин формулирует в рамках своей системы допущений математическую модель для исследования частных параметров

состояния, зачастую не учитывающих важных явлений, наблюдаемых в реальном процессе.

Перспективным направлением решения комплексной многодисциплинарной научной проблемы, которая формируется при столкновении судов, является проведение модельных, полунатурных и натурных испытаний. Но это связано с большими материальными затратами.

Альтернативным подходом представляется использование расширяющихся возможностей вычислительной техники по численному моделированию ударного взаимодействия деформирующихся и разрушающихся конструкций судов, которые находятся в движении на границе водной и воздушной сред. Отдельные аспекты такого подхода уже реализуются [1], [2], [3] с помощью вариационно-разностного метода конечных элементов и мощных вычислительных комплексов [4], [5]. Такие попытки еще единичны весьма трудоемки и представляют собой уникальные научные исследования.

Одной из важных целей исследования столкновения судов является оценка энергопоглощения деформируемыми и разрушающимися конструкциями, что необходимо для целей проектирования. Во многих случаях можно ограничиться упрощенными численными процедурами на примере одномерных моделей сталкивающихся судов с учетом их пластического деформирования, но движущихся в водной среде. В настоящей статье предпринята попытка выполнить оценку влияния сопротивления воды при моделировании динамического процесса столкновения судов с использованием балочных конечных элементов и конечно-разностных процедур.

### 1. Расчетная модель

Рассматривается наиболее опасный сценарий столкновения судов, когда движущееся в жидкости с постоянной скоростью таранящее судно ударяет под прямым углом в борт миделевого сечения таранимого судна, неподвижно покоящееся в жидкости. Удар абсолютно неупругий. В течение и до окончания процесса внедрения таранящего судна в таранимое, суда совершают совместное движение.

Таранимое судно под действием поперечного удара перемещается в направлении удара, совершая движения поперечной качки, деформируется в горизонтальной плоскости, сминается и разрушается в зоне контакта. Таранящее судно после удара совершает продольно-поступательное движение, деформируется и сминается в продольном направлении. Деформирование моделей судов в зоне контакта считается нелинейным в соответствии с теорией пластического течения с учетом разгрузки.

В этих условиях для таранимого судна достаточно использовать одномерную модель балки, а для таранящего судна одномерную модель стержня.

Зависимость изменения контактной силы в процессе удара таранящего судна в борт таранимого судна, сопровождающегося разрушением его конструкции принята на основе аппроксимации серии результатов детальных численных расчетов по

пространственным моделям типовых конструкций транспортных судов [6], [7].

### 2. Исследование с помощью КЭА

Реализация решения задачи о столкновении судов с помощью конечно-элементного анализа (КЭА) выполнена в программном комплексе ANSYS [8] с помощью процедуры динамического анализа переходных процессов, происходящих в корпусах таранящего и таранимого судов. Таранящее судно имело длину 60 м, водоизмещение 1800 т, а таранимое длиной при длине 45 м обладало водоизмещением 542 т.

В рамках упрощенной модели корпус таранимого судна представляется призматической балкой, изгибающейся в горизонтальной плоскости с жесткостными и массовыми характеристиками поперечного сечения, соответствующими миделевому сечению корпуса. Влияние жидкости на динамический процесс учитывалось с помощью присоединенных масс [9]. Балка разбивалась на 61 конечный элемент типа BEAM188 с задаваемыми опциями, которые соответствовали математической модели балки Эйлера – Бернулли без учета деформации сдвига [10].

Корпус таранящего судна представлялся стержнем, переменной массы, имеющим форму кругового цилиндра, разбивался на 91 конечный элемент типа LINK180. Кинематические граничные условия таранящего судна, соответствовали свободноплавающему состоянию безопорной балки. Поведение упругопластического материала описывалось нелинейной моделью изотропного упрочнения по теории Мизеса [8]. Для моделей судов принят материал углеродистая сталь со следующими характеристиками: модуль Юнга  $2,1 \cdot 10^5$  МПа; плотность материала 7800, кг/м<sup>3</sup>; модуль упрочнения  $8,0 \cdot 10^2$  МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 208 МПа.

На рисунке 1 изображена расчетная модель столкновения судов в виде балочной модели таранимого судна и стержневой модели таранящего судна с указанием граничных условий, реакций и контактной силы.

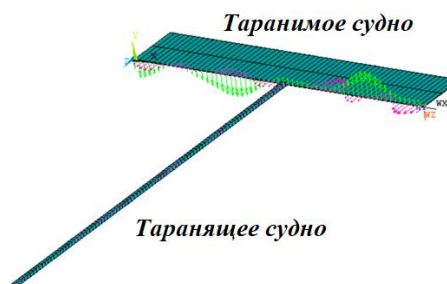


Рис. 1. Одномерные модели таранимого и таранящего судна с изображением граничных условий, реакций и действия контактной силы

В результате расчетов получена информация по изменению параметров напряженно-деформированного состояния сталкивающихся моделей судов. Ниже представлено обобщение наиболее характерных параметров. На рисунке 2 показана форма деформирования корпуса таранимого судна, соответствующая состоянию

максимальных напряжений горизонтального изгиба. Напряжения указаны в Паскалях.

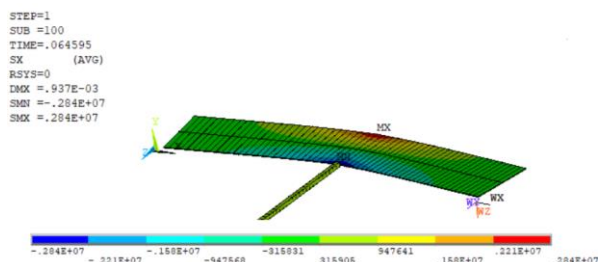


Рис.2. Напряженно-деформированное состояние балочной модели таранимого судна и поле нормальных напряжений горизонтального изгиба.

Для оценки влияния водной среды на значения параметров напряженно-деформированного состояния таранимого судна дополнительно были выполнены расчеты для тех же входных данных только без учета присоединенных масс жидкости. В результате установлено, что напряжения, возникающие в балочной модели таранимого судна с учетом сопротивления воды, как присоединенной массы, превышают значения напряжений, возникающих в балочной модели таранимого судна без учета сопротивления воды на 15 %.

Результаты исследования горизонтальных перемещений точки ударного контакта таранимого судна во времени представлено графически на рисунке 3. Здесь для общности использованы безразмерные величины перемещений в точке контакта  $w^*$  в зависимости от безразмерного времени  $t^*$ .

Время процесса отнесено к величине  $R_0/a_0$ :

$$t^* = t \cdot \frac{a_0}{R_0}, \quad (1)$$

где

$a_0$  – скорость звука в воде;

$R_0$  – приведенный радиус поперечного сечения таранимого судна, вычисляемый по формуле

$$R_0 = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{\pi \cdot \rho_0} \cdot \frac{D}{L}} \quad (2)$$

$D$  – водоизмещение таранимого судна;

$L$  – длина таранимого судна;

$\rho_0$  – плотность воды;

Прогиб в точке ударного контакта отнесен к ширине корпуса

$$w^* = \frac{W}{B} \quad (3)$$

Видно, что различия максимальных значений безразмерных перемещений контактной зоны при учете влияния присоединенных масс жадности доходят до 30%.

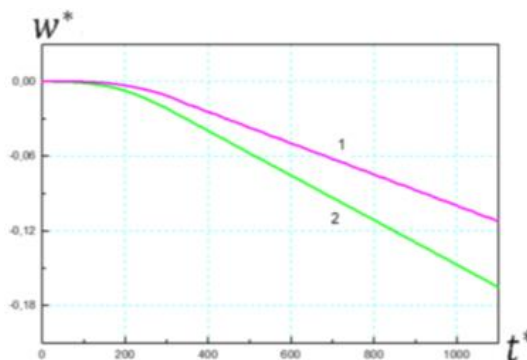


Рис.3. Изменение в процессе удара горизонтальных перемещений точки ударного контакта таранимого судна, полученное с помощью расчетной модели МКЭ: 1 – без учета жидкости. 2 – с учетом жидкости.

### 3. Исследование с помощью КРП

В работе помимо метода конечных элементов использовался алгоритм совместного решения дифференциальных уравнений движения сталкивающихся судов с учетом их пластического деформирования в контактной зоне. С этой целью была реализована конечно-разностная процедура (КРП), описанная в работе [11]. Контактная зона при таране отождествлялась с зоной внедрения модели таранящего судна в таранимое; ширина контактной зоны определялась формой носовой части модели таранящего судна. Зависимость контактной силы принималась такой же, как и в моделях метода конечных элементов.

Сопоставление результатов конечно-разностного анализа и метода конечных элементов в виде изменения прогиба в контактной зоне столкновения для расчетной модели призматической балки таранимого судна и стержневой модели таранимого судна по данным п.2 настоящей статьи представлено на рисунке 4. Видно, что различие результатов расчета в рассматриваемом диапазоне времени по МКЭ и КРП для случая без учета жидкости составляет 13%, а с учетом жидкости доходит до 23%.

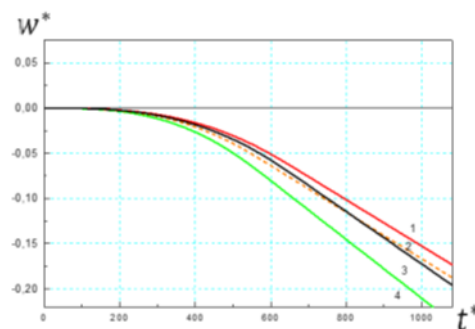


Рис.4. Изменение в процессе удара горизонтальных перемещений точки ударного контакта таранимого судна: 1- МКЭ без учета жидкости; 2-МКЭ с учетом жидкости; 3 – КРП без учета жидкости; 4- КРП с учетом жидкости.

Дальнейшие исследования возможности применения КРП проводились с большей детализацией входных параметров для сталкивающихся судов. Таранимое судно – рефрижераторное грузовое судно водоизмещения 3760 т, а таранящим судном являлось сухогрузное водоизмещением 5700т. Главные размерения судов представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Основные характеристики сталкивающихся судов**

| Параметр                  | Размерность | Обозначение | Таранимое судно | Таранящее судно |
|---------------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 1                         | 2           | 3           | 4               | 5               |
| Длина                     | м           | $L$         | 105,0           | 135,0           |
| Ширина                    | м           | $B$         | 13,0            | 15,0            |
| Высота борта              | м           | $H$         | 8,0             | 9,8             |
| Осадка                    | м           | $T$         | 4,8             | 5,6             |
| Коэффициент общей полноты | –           | $C_b$       | 0,56            | 0,49            |

Для моделей судов принят материал углеродистая сталь со следующими характеристиками: модуль нормальной упругости  $2,1 \cdot 10^5$  МПа; модуль упрочнения  $8,0 \cdot 10^2$  МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел прочности 260 МПа, плотность материала 7800, кг/м<sup>3</sup>. Распределение по длине судов нагрузки масс принято переменным в соответствии с кусочно-линейным распределением по трем районам, носовому, центральной части и кормовому. Графики нагрузки масс для таранящего и таранимого судов представлены на рисунках 5 и 6 соответственно.

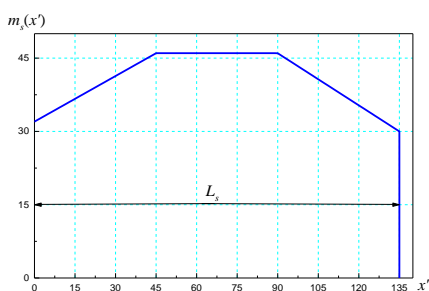


Рис.5. Распределение весовой нагрузки модели таранящего судна по его длине.

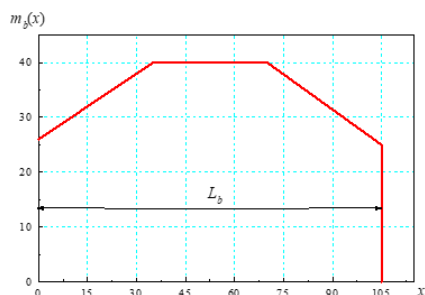


Рис.6. Распределение весовой нагрузки модели таранимого судна по его длине.

Результаты расчета рассматриваемого варианта сталкивающихся судов представлены на рисунке 7 в форме изменение в процессе удара горизонтальных перемещений точки ударного контакта таранимого судна.

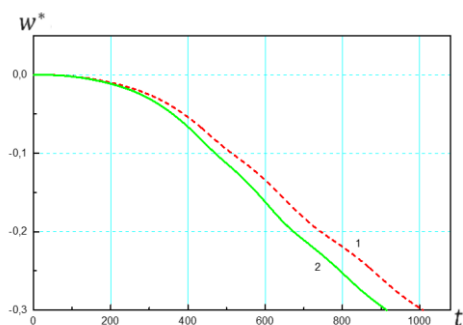


Рис.7. Изменение прогиба в контактной зоне столкновения таранимого рефрижераторного судна, определенное с помощью КРП: 1 – без учета жидкости; 2 – с учетом жидкости.

Из полученных результатов следует, что учет жидкости для таранимого судна приводит к увеличению относительных прогибов на 18%.

Таким образом учет сопротивления жидкости при таране неподвижного таранимого судна как деформируемой балки со свободными концами приводит к большим повреждениям, поскольку меньшая часть кинетической энергии движения таранящего судна переходит в кинетическую энергию таранимого судна, а оставшаяся часть энергии расходуется на энергию деформации и разрушения таранимого судна.

**Заключение**

В статье исследуются возможности использования одномерных моделей сталкивающихся судов по сценарию бортового тарана для анализа кинематических, силовых и энергетических параметров. Удар считается неупругим. Суда находятся в жидкости, при внедрения таранящего судна в таранимое, суда совершают совместное движение. Деформирование моделей судов в зоне контакта считается нелинейным в соответствии с теорией пластического течения с учетом разгрузки. Влияние сопротивления заборной воды учитывается как присоединенная масса модели таранимого судна. Таранимое судно изгибается в горизонтальной плоскости как балка, а таранящее судно деформируется в продольном направлении.

Решение задачи в предложенной постановке реализовано с помощью одномерных конечных элементов в программном комплексе ANSYS и с помощью специально созданной конечно-разностной процедуры.

Получено изменение прогиба таранимого судна в процессе удара, представленное через обобщенные безразмерный параметры.

Выполнено сопоставление результатов серии расчетов для реализованных процедур. Установлен приемлемый для одномерных моделей диапазон относительных расхождений результатов.

Исследовано влияние учета жидкости на параметры напряженно-деформированного

состояния таранимого судна на нескольких примерах сталкивающихся судов.

Установлено, что учет сопротивления жидкости для свободно плавающего судна приводит к большим объемам повреждения при его бортовом таране.

В работе подтверждена возможность использования одномерных моделей сталкивающихся судов для исследования широкого диапазона кинематических силовых и энергетических параметров, необходимых для прогнозирования и анализа последствий навигационных аварий.

#### Литература

1. Minorsky V. U. An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants. Journal of ship research. 1959, № 8.
2. Reckling. K. (1993) Mechanics of Minor Ship Collisions.– International Journal of Impact Engineering, 1993, Vol. 1, No. 3, p.p. 281-299
3. 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.).
4. Родионов А.А., Аунг Куи Мьинт, Коршунов В.А., Пономарев Д.А. «Исследование динамических характеристик при посадке судна на мель». В сб. «Труды Крыловского государственного научного центра». Вып.89.2 (373.2). СПб 2015.с.109-122.
5. Родионов А.А., Коршунов В.А., Пономарев Д.А. «Численное моделирование процессов деформирования пространственных конструкций судов и морских инженерных сооружений при динамическом воздействии водо-воздушной среды». «Морской вестник». 2017. Спецвыпуск №1(13). с.49-55.
6. 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.
7. 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.
8. ANSYS Tutorial Release 2022/ Structural & Thermal Analysis Using the ANSYS Mechanical APDL Release 2022 Environment/<https://www.sdcpublishations.com/Textbooks/ANSYS-Tutorial-Release-2022/ISBN/978-1-63057-543-4/>
9. Замышляев Б. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л., «Судостроение», 1967. – 388 с.
10. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. – 420 с.
11. 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.

#### References

1. Minorsky V. U. An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants. Journal of ship research. 1959, № 8.
2. Reckling. K. (1993) Mechanics of Minor Ship Collisions. – International Journal of Impact Engineering, 1993, Vol. 1, No. 3, pp. 281-299
3. 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)].
4. Rodionov A.A., Aung Kui M'int, Korshunov V.A., Ponomarev D.A. «Issledovanie dinamicheskikh harakteristik pri posadke sudna na mel'». V sb. «Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra» [«Study of dynamic characteristics during ship grounding». In col. «Transactions of the Krylov state research centre»]. Issue 89.2 (373.2). SPb 2015. pp.109-122.
5. Rodionov A.A., Korshunov V.A., Ponomarev D.A. "Chislennoe modelirovanie processov deformirovaniya prostranstvennykh konstrukcij sudov i morskikh inzhenernykh sooruzhenij pri dinamicheskom vozdeystvii vodo-vozdushnoj sredy" "Morskoy vestnik" ["Numerical modeling of the processes of deformation of spatial structures of ships and offshore engineering structures under the dynamic impact of the water-air environment" "Morskoy vestnik"] 2017. Special issue No. 1 (13). pp.49-55.
6. Vasil'ev R. V., Rodionov A. A. «Ocenka kriteriev razrusheniya sudovykh konstrukcij pri chislennom modelirovanii 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.
7. Rodionov A. A. Go Czyun'; «Issledovanie problem predel'noj prochnosti korpusnykh konstrukcij pri povrezhdeniyah 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.
8. ANSYS Tutorial Release 2022/ Structural & Thermal Analysis Using the ANSYS Mechanical APDL Release 2022 Environment/<https://www.sdcpublishations.com/Textbooks/ANSYS-Tutorial-Release-2022/ISBN/978-1-63057-543-4/>
9. Zamyshlyaev B. V., Yakovlev YU. S. Dinamicheskie nagruzki pri podvodnom vzryve. L., «Sudostroenie» [Dynamic loads during underwater explosion], 1967. – 388 p.

10. Kachanov L. M. Osnovy teorii plastichnosti. M.: Nauka [Fundamentals of the theory of plasticity], 1969. – 420 p.
11. 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.

**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**, аспирант кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: evgeniakappenko@gmail.com

**Evgeniya A. Karpenko**, Graduate student of department of ship mechanics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: evgeniakappenko@gmail.com

**Дмитрий Александрович Пономарев**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: ponomarev.smk@corp.smtu.ru

**Dmitry A. Ponomarev**, 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: ponomarev.smk@corp.smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 27.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 31.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 02.11.2022.

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ  
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**  
**TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF  
SHIPBUILDING PRODUCTION**

Научная статья

УДК 620.197.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.005>

**Перспективный материал для защиты от коррозии и обрастания**

Р.С. Ходжаев<sup>1</sup> [xodzhaev.rustam@yandex.ru](mailto:xodzhaev.rustam@yandex.ru), А.П. Сахоненкова<sup>2</sup> [anna\\_shishkina@khlopin.ru](mailto:anna_shishkina@khlopin.ru),

В.И. Трусов<sup>1</sup> [vtrui2008@mail.ru](mailto:vtrui2008@mail.ru), А.Е. Мирославов<sup>2</sup> [amiroslavov@khlopin.ru](mailto:amiroslavov@khlopin.ru),

А.А. Грибанькова<sup>1</sup> [agribankova@mail.ru](mailto:agribankova@mail.ru), Е.И. Пласкеева<sup>1</sup> [ekaterina.plaskeeva@list.ru](mailto:ekaterina.plaskeeva@list.ru)

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

<sup>2</sup> АО «Радиевый институт им.В.Г.Хлопина

**Аннотация.** Объектом исследования является реакторный технеций, который может быть получен в виде пертехнетата калия при переработке жидких радиоактивных отходов. В настоящее время направляется на захоронение. По литературным данным середины прошлого века, пертехнетат-ион обладает свойством ингибировать коррозию стали. Из-за дефицитности и дороговизны технеция, а также вследствие глобальной радиофобии после катастрофы на Чернобыльской АЭС, исследования были полностью прекращены или переведены в режим «ноу-хау». Целью работы является изучение возможности утилизации пертехнетата калия в технологиях защиты металлов от коррозии. Испытания на образцах стали Ст3 проводились с погружением в аэрированную водопроводную воду при комнатной температуре. Коррозию измеряли в процентах поражения поверхности образцов. В результате проделанной работы экспериментально доказаны необычно высокие защитные свойства пертехнетата калия в качестве ингибитора коррозии для водных сред, превышающие возможности традиционных хроматов. Предложены области применения  $\text{KTcO}_4$  в системах охлаждения и гидроиспытаний емкостного оборудования. Обоснована возможность введения пертехнетата калия взамен хроматов в состав конверсионного фосфатного покрытия NOTEX. Предложен новый состав NOTEX-Tc для химической подготовки металлических поверхностей под нанесение лакокрасочных покрытий. Срок службы покрытия возрастает при этом не менее чем в два раза, а технология применения не требует особых мер техники безопасности. На основании свойства мягкой  $\beta$ -активности технеция и его соединений высказана гипотеза о возможности разработки нового судового покрытия пертехнетатом калия в качестве ингибитора коррозии и в качестве биоцида для защиты от морского обрастания.

**Ключевые слова:** соединения технеция, ингибиторы коррозии, конверсионное фосфатное покрытие, области применения

**Для цитирования:** Ходжаев Р.С., Сахоненкова А.П., Трусов В.И., Мирославов А.Е., Грибанькова А.А., Пласкеева Е.И. Перспективный материал для защиты от коррозии и обрастания. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 51—57.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.005>

**Promising material for protection against corrosion and fouling**

Rustam S. Khodzhaev<sup>1</sup> [xodzhaev.rustam@yandex.ru](mailto:xodzhaev.rustam@yandex.ru), Anna P. Sakhanenkova<sup>2</sup> [anna\\_shishkina@khlopin.ru](mailto:anna_shishkina@khlopin.ru),

Valery I. Trusov<sup>1</sup> [vtrui2008@mail.ru](mailto:vtrui2008@mail.ru), Alexander E. Miroslovov<sup>2</sup> [amiroslavov@khlopin.ru](mailto:amiroslavov@khlopin.ru),

Angela A. Gribankova<sup>1</sup> [agribankova@mail.ru](mailto:agribankova@mail.ru), Ekaterina I. Plaskeeva<sup>1</sup> [ekaterina.plaskeeva@list.ru](mailto:ekaterina.plaskeeva@list.ru)

<sup>1</sup> St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, <sup>2</sup> V.G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The object of the study is reactor technetium, which can be obtained in the form of potassium pertechnetate during the processing of liquid radioactive waste. It is currently being sent for burial. According to the literature data of the middle of the last century, the pertechnetate ion has the property of inhibiting corrosion of steel. Due to the scarcity and high cost of technetium, as well as due to global radiophobia after the Chernobyl disaster, research was completely discontinued or transferred to the "know-how" mode. The aim of the work is to study the possibility of utilization of potassium pertechnetate in metal corrosion protection technologies. Tests on St3 steel samples were carried out by immersion in aerated tap water at room temperature. Corrosion was measured as a percentage of damage to the surface of the samples. As a result of the work done, unusually high protective properties of potassium pertechnetate as a corrosion inhibitor for aqueous media, exceeding the capabilities of traditional chromates, have been experimentally proven. The fields of application of  $\text{KTsO}_4$  in cooling systems and hydro-tests of capacitive equipment are proposed. The possibility of introducing potassium pertechnetate instead of chromates into the NOTEX conversion phosphate coating is substantiated. A new composition of NOTEX-Ts is proposed for the chemical preparation of metal surfaces for the application of paint coatings. The service life of the coating increases at least

twice, and the technology of application does not require special safety measures. Based on the properties of soft  $\beta$ -activity of technetium and its compounds, a hypothesis has been proposed about the possibility of developing a new marine coating with potassium pertechnetate as a corrosion inhibitor and as a biocide to protect against marine fouling.

**Keywords:** technetium compounds, corrosion inhibitors, conversion phosphate coating, applications

**For citation:** Rustam S. Khodzhaev, Anna P. Sakhanenkova, Valery I. Trusov, Alexander E. Miroslavov, Angela A. Gribankova, Ekaterina I. Plaskeeva, Promising material for protection against corrosion and fouling, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 51—57.

### Введение

Среди средств активной противокоррозионной защиты металлов особое место занимают ингибиторы коррозии, которые способны тормозить все виды разрушений, включая наиболее опасные питтинговые, язвенные, межкристаллитные и др. Они могут применяться как самостоятельно, так и в сочетании с методами электрохимической защиты, конверсионными, лакокрасочными покрытиями, в средствах временной защиты. Чаще всего для ингибирования коррозии в атмосферных условиях и в нейтральных водных средах применяются амины, нитриты, хроматы и их производные [1]. Наше внимание привлекла публикация США 1955 года [2], в которой в качестве ингибитора коррозии для водных сред предлагается пертехнетат-ион. Сообщается, что ингибитор работает в воде в концентрациях всего 5-50 ppm температурой до 250°. Речь идет о воде-теплоносителе АЭС, так что температура выражена, вероятно, в градусах Цельсия.

Технеций – металл подгруппы марганца, но у соседних перманганатов и перренатов ингибирующие свойства высших форм (+7) отсутствуют. У технеция нет стабильных изотопов, поэтому в природных материалах он отсутствует. Источником получения служит реакторный технеций, откуда он может быть выделен в виде пертехнетатов Tc-99 в процессе переработки жидких радиоактивных отходов.

Позднее в США, а затем и в ряде других стран запатентован метод утилизации технеция-99 для защиты от коррозии и обрастания [3,4]. Во всех патентах данной группы единый патентообладатель и автор технических решений - Carl B. Wootten. Автор предложил любым доступным способом металлизировать технецием защищаемую поверхность металла с последующим перекрытием материалом, пропускающим  $\beta$ -излучение технеция. Технеций является мягким  $\beta$ -излучателем и для подавления жизнедеятельности морских обрастателей необходим их непосредственный контакт с технецием. В патенте отмечено, что смертельную дозу любой живой организм получит в течение 24-48 часов. Последний патент относится к 1985 году [4], а через год случился Чернобыль и наступила глобальная радиофобия. По этой причине, а также из-за дефицита и дороговизны технеция все исследования были прекращены. В России нашел применение только короткоживущий изотоп технеция в радиомедицине, весь реакторный технеций в настоящее время направляется на захоронение. Никаких новых открытых литературных источников нами не выявлено, при этом вполне возможна охрана технологий применения технеция в форме секрета производства.

С тех пор прошло более 35 лет, атомная промышленность успешно развивается, а проблема утилизации реакторного технеция стала более

актуальной. Целью настоящей работы является экспериментальная оценка ингибирующих свойств пертехнетата калия и поиск возможных путей его применения в технологиях защиты от коррозии.

### Методика и материалы

Пертехнетат калия известен как ингибитор коррозии для водных сред, поэтому для подтверждения его ингибирующих свойств использован метод погружения стального образца в аэрированную воду системы холодного водоснабжения. Концентрация  $\text{KTcO}_4$  в воде варьировалась от 1% до 10-4%. Контрольный опыт – вода без ингибитора. Образцами для коррозионных испытаний служили свидетели коррозии - плоские металлические пластины из углеродистой стали Ст3 прямоугольной формы 50x25x2,7 мм, полированные по ГОСТ 380-2005. Подготовка образцов проведена в соответствии с ГОСТ 9.905. Готовились по два параллельных образца. Состояние образцов в процессе и по завершении испытаний оценивалось визуально. Осмотр образцов производился ежедневно. Оценка защитных свойств проводилась по площади коррозионных разрушений, возникших за время испытаний, и времени возникновения первого минимального очага коррозии. (ГОСТ 9.311). За 100% площади принималась площадь образца с двух сторон. Площадь коррозионных поражений определяли непосредственным измерением площади всех коррозионных очагов наложением на оцениваемую поверхность прозрачной пластины с нанесенной на неё измерительной сеткой. При невозможности непосредственного измерения очаг очерчивали прямоугольной фигурой и вычисляли её площадь.

### Результаты коррозионных испытаний

Образцы-свидетели выдерживались в водных растворах  $\text{KTcO}_4$ , в холостом опыте используемая вода не содержала добавки ингибитора. В качестве ингибитора сравнения использован водный раствор дихромата калия. Отсутствие защиты в холостом опыте проявилось уже в первые сутки, вода имела выраженный цвет продуктов коррозии стали. Установлено, что 100%-ная защита от коррозии наблюдается при концентрациях пертехнетата калия от 0,01% (см. рис. 1-3)



Рис. 1. Общий вид погруженных образцов в раствор  $\text{KTcO}_4$  различных концентраций.

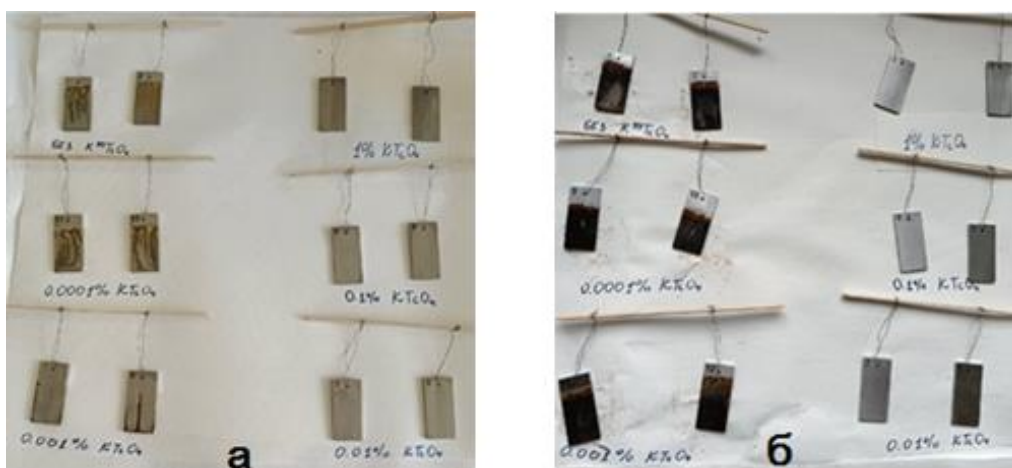


Рис. 2 Образцы-свидетели в процессе испытаний через одни сутки (а) и 11 суток (б).

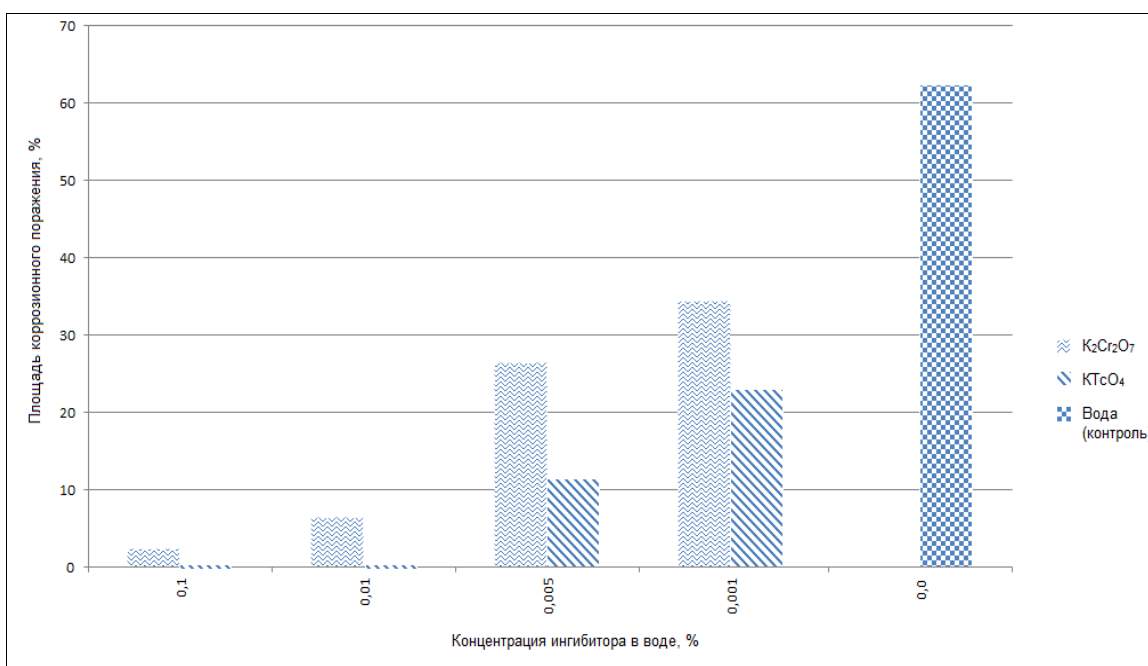


Рис.3 Защитные свойства  $K_2CO_4$  в сравнении с  $K_2Cr_2O_7$ .

Таблица 1

Защитные свойства  $K_2CO_4$  в сравнении с  $K_2Cr_2O_7$

| Вариант опыта                  | Площадь коррозионного поражения, % | Балл |
|--------------------------------|------------------------------------|------|
| Вода (контроль)                | 63,5                               | 1    |
| Раствор $K_2Cr_2O_7$ (0,1 %)   | 2,5                                | 6    |
| Раствор $K_2Cr_2O_7$ (0,01 %)  | 6,5                                | 4    |
| Раствор $K_2Cr_2O_7$ (0,005 %) | 26,5                               | 2    |
| Раствор $K_2Cr_2O_7$ (0,001 %) | 34,5                               | 2    |
| Раствор $K_2CO_4$ (0,1 %)      | 0                                  | 10   |
| Раствор $K_2CO_4$ (0,01 %)     | 0                                  | 10   |
| Раствор $K_2CO_4$ (0,005 %)    | 11,5                               | 3    |
| Раствор $K_2CO_4$ (0,001 %)    | 23                                 | 3    |

**Возможные области применения пертехнетата калия**

Полученные данные свидетельствуют об исключительно высоких защитных свойствах пертехнетата калия, они многократно превышают возможности дихромата калия. Ингибирующие материалы с Тс (+7) уникальны, они представляют несомненный научный и практический интерес, нуждаются в исследовании механизма защитного действия. По величине минимальной защитной концентрации  $KTcO_4$  в воде наши данные подтверждают выводы [2]. В этой работе, по всей вероятности, использована вода-теплоноситель АЭС и речь шла об ее ингибировании. Современные конструкционные материалы реакторного оборудования устойчивы к коррозии и не нуждаются в использовании водных ингибиторов коррозии в контурах. Пертехнетат калия может быть успешно использован в замкнутых водных и водно-гликолевых системах охлаждения, на гидростендах при испытаниях емкостного оборудования с многократным использованием ингибированной воды, которая при длительном хранении всегда останется «мертвой» и нуждается только в периодической очистке от механических загрязнений. При этом концентрация ингибитора в сотни раз меньше, чем у всех используемых на практике материалов.

Но основным средством противокоррозионной защиты являются, как известно, лакокрасочные материалы (ЛКМ). Для повышения эффективности и долговечности ЛКМ их можно комбинировать с ингибиторами коррозии. Пертехнетат калия растворим в воде, поэтому в системах органорастворимого ЛКМ введение его в грунтовочный слой требует выполнения предварительных тестов на совместимость. Значительно проще вариант с использованием носителя (матрицы) ингибитора, например, конверсионного покрытия. Самым универсальным и эффективным, не создающим слоя как грунт, совместимым тем самым с большинством известных типов ЛКМ являются, как известно, водные фосфатирующие составы. Нами выбран материал «НОТЕХ», поставляемый в виде концентрата

«НОТЕХ-К» [14,15]. Фосфатный слой затрудняет доступ кислорода к металлу, то есть проявляет эффект катодного ингибитора. Для придания пассивирующих свойств «НОТЕХ» содержит ингибитор анодного, окислительного типа - соединения Cr (+6). За счет подавления подпленочной коррозии под слоями основного покрытия, срок службы ЛКМ возрастает в 1,5-2 раза [6].

Нами установлена возможность введения  $KTcO_4$  в «НОТЕХ-К» взамен хроматов и приготовлен новый фосфатирующий состав «НОТЕХ-Тс». Количество пертехнетата выбрано из расчета молярного равенства хрома и технеция. Поскольку основой нового состава служит концентрат «НОТЕХ-К», представляется целесообразным взять за основу его показатели качества. В соответствии с техническими условиями ТУ 2149-002-48938796 - 2003 «НОТЕХ-К» должен отвечать нормам табл.2.

Изготовленная опытная партия «НОТЕХ-Тс» была проверена на соответствие ТУ 2149-002-48938796 -2003: Из данных табл. 1 видно, что новый «НОТЕХ-Тс» соответствует показателям качества своего предшественника с небольшим отклонением по показателю общей кислотности. Дело в том, что хроматы вводятся в состав «НОТЕХ» в виде хромового ангидрида, образующего в водном растворе хромовую кислоту  $H_2CrO_4$ , а  $KTcO_4$  форма нейтральная.

Технология применения аналогична «НОТЕХ-К», концентрат разводят водой в соотношении 1:2 и наносят любым способом 1-2 раза. Специальных средств индивидуальной защиты «НОТЕХ-Тс» не требует, для полного поглощения  $\beta$ -излучения достаточно защитного костюма, перчаток и защитных очков. Нанесенный состав перекрывается слоями ЛКМ, задерживающими излучение, поэтому нет опасностей для объектов окружающей среды. В табл.3и на рис.4приведены данные по мощности дозы в зависимости от расстояния до образца. Согласно НРБ-99 СП 2.6.1.758-99 мощность эффективной дозы (для  $\gamma$ -излучения) на рабочем месте не должна превышать 2,5 мкЗв/ч; Прослойки воздуха равной 20 см вполне достаточно для обеспечения безопасной работы с НОТЕХ-Тс.

Таблица 2

Показатели качества

| N/N | Наименование показателя            | Единица измерения | Метод анализа       | Фосфатирующий состав |          |
|-----|------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|----------|
|     |                                    |                   |                     | НОТЕХ-К              | НОТЕХ-Тс |
| 1   | Плотность при 200С                 | г/см <sup>3</sup> | По ГОСТ 18 995.1-73 | 1,18–1,22            | 1,20     |
| 2   | Концентрация водородных ионов (рН) | ед. рН            | По ТУ               | 1,0 – 1,3            | 1,2      |
| 3   | Общая кислотность                  | *точки            | По ТУ               | 210 - 240*           | 198      |

\*Точки – условная единица – умноженный на 10 объем 0,1н раствора гидроксида натрия, пошедшего на титрование 0,5мл «НОТЕХ»

Таблица 3

Мощность поглощенной дозы концентрата и разбавленного НОТЕХ-Тс

| Расстояние от образца, мм | Мощность поглощенной дозы мкЗв/ч |       |              |       |
|---------------------------|----------------------------------|-------|--------------|-------|
|                           | Концентрат                       |       | Разбавленный |       |
| 0                         | 320,0                            | 306,7 | 180,0        | 180,0 |
|                           | 300,0                            |       | 180,0        |       |
|                           | 300,0                            |       | 180,0        |       |
| 35                        | 105,0                            | 108,3 | 95,0         | 93,3  |
|                           | 110,0                            |       | 90,0         |       |
|                           | 110,0                            |       | 95,0         |       |
| 60                        | 40,0                             | 38,3  | 40,0         | 40,0  |
|                           | 40,0                             |       | 40,0         |       |
|                           | 35,0                             |       | 40,0         |       |
| 80                        | 20,0                             | 20,0  | 20,0         | 20,0  |
|                           | 20,0                             |       | 20,0         |       |
|                           | 20,0                             |       | 20,0         |       |
| 100                       | 10,0                             | 10,0  | 11,0         | 10,8  |
|                           | 10,0                             |       | 11,0         |       |
|                           | 10,0                             |       | 10,5         |       |
| 120                       | 7,0                              | 7,3   | 7,0          | 7,3   |
|                           | 7,5                              |       | 7,5          |       |
|                           | 7,5                              |       | 7,5          |       |
| 200                       | 2,1                              | 2,1   | 2,0          | 2,0   |
|                           | 2,1                              |       | 2,0          |       |
|                           | 2,1                              |       | 2,1          |       |

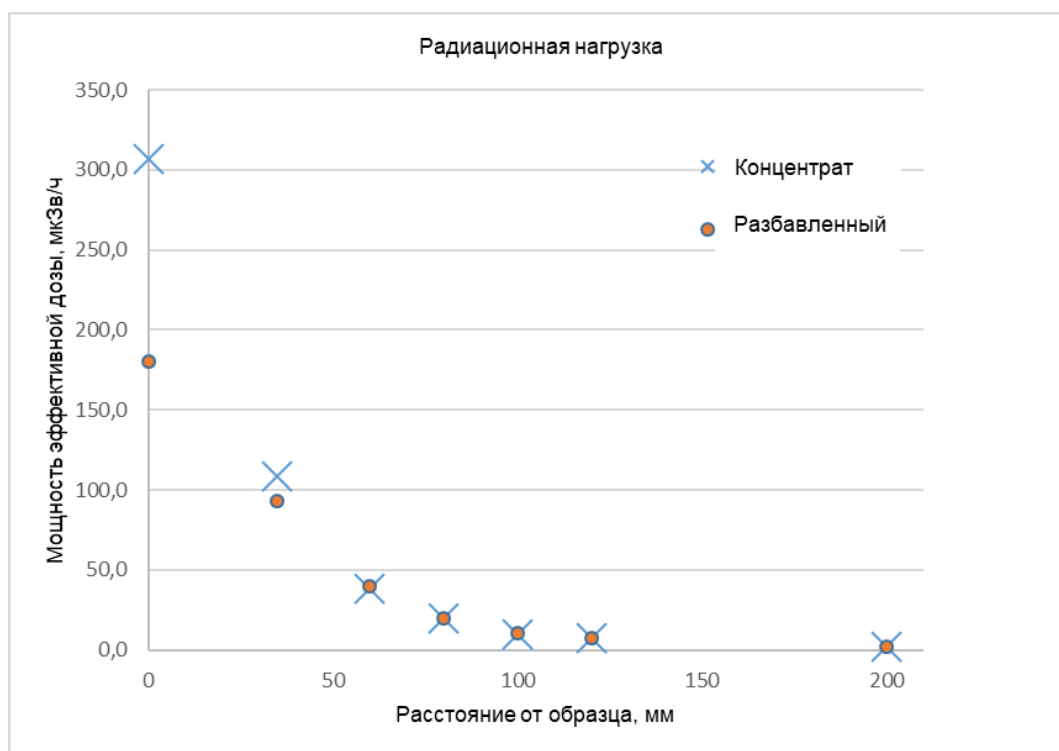


Рис.4 Снижение радиационной нагрузки в зависимости от расстояния

Наиболее интересна в патентах Carl V. Wootten [3,4] идея совмещения в одном материале свойств противокоррозионного и противообрастающего покрытия, при этом не указывались защищаемые объекты и технология метода. К сожалению, и при современном уровне развития техники металлизация технецием больших поверхностей, например, подводного борта корабля, не представляется возможной. Кроме того,

перекрытие ЛКМ, пропускающим β-частицы также невозможно, таких материалов не создано. Реально осуществим на практике следующий вариант с использованием пертехнетата калия:

1. Подготовка поверхности абразивоструйная до степени Sa 2,5 или механическая до степени St2 с последующим фосфатированием «НОТЕХ-Тс».

2. Нанесение слоев противокоррозионной эмали для подводного борта с добавлением пертехнетата калия.

«НОТЕХ-Тс» обеспечивает повышение степени защиты от коррозии и работает на сохранность ЛКМ. Пертехнетат в составе эмали работает на защиту от обрастания.

#### Заключение

Таким образом, в проделанной работе экспериментально подтверждены необычно высокие защитные свойства пертехнетата калия в водных растворах в концентрациях на уровне 0,01%. Несомненный интерес представляет его исследование в качестве ингибитора атмосферной коррозии. Вполне возможно, что речь идет о самом эффективном ингибиторе контактного типа действия. Механизм защиты пертехнетатов не изучался, по всей вероятности, происходит восстановление пертехнетат-иона до наиболее устойчивого пассивирующего оксида  $TcO_2$ .

Предложено новое конверсионное фосфатное покрытие «НОТЕХ-Тс», в котором

хроматный ингибитор заменен на пертехнетат калия. Применение прежнего «НОТЕХ» в системах лакокрасочного покрытия позволяло увеличить срок службы ЛКМ в 1,5-2 раза. Можно предполагать, что с техницием химическая подготовка под окраску будет еще более эффективна. Срок службы ЛКМ будет сопоставим с металлическими покрытиями.

Технологический процесс нанесения НОТЕХ-Тс не представляет особой опасности для человека и окружающей среды. Широко используемые на практике в настоящее время нитриты и хроматы чрезвычайно токсичны, являются веществами первого класса опасности.

Высказана научная гипотеза о возможности разработки нового покрытия для подводного борта корабля с использованием в качестве биоцида пертехнетатов за счет их  $\beta$ -активности. Корабельная эмаль при этом будет сочетать свойства усиленной защиты от коррозии и обрастания. Гипотеза, конечно, нуждается в экспериментальной проверке путем стендовых и натуральных испытаний.

#### Литература

1. Розенфельд И.Л. Ингибиторы коррозии - М. Химия. 1977. 150С.
2. Clinton E. Ballou, Hermann O.L. Fischer, D.L. McDonald. The pertechnetate Ion As An Inhibitor of Corrosion// J. Amer. Chem. Soc. - 1955. Vol. 77. P. 2658.
3. Carl B. Wootten. Патент №4017370 [US]. Method for prevention of fouling by marine growth and corrosion utilizing Technetium-99. По заявке №473691, приор. 28.05.1974, опублик. 12.04.1977.
4. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [Au] 506551. 1980.
5. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [Ca] 1126497. 1982.
6. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [GB] 152669. 1978.
7. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [PT] 66090. 1977.
8. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [ZA] 7732. 1977.
9. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [IT] 1077269. 1985.
10. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [FR] 2378103. 1978.
11. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [ES] 455152. 1978.
12. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [DE] 2701032. 1978.
13. Carl B. Wootten. (Страна, номер охранного документа, год публикации) - [CH] 608249. 1978.
14. E.I. Plaskeeva, V.I. Trusov Inhibited Composition for work in marine condition. E3S Web of Conferences. Vol. 121 02011 (2019). International Conference «Corrosion in the Oil and Gas Industry» Saint-Petersburg, Russia May 22-24, 2019.
15. Пласкеева Е.И., Полянская Д.А., Трусов В.И., Ходжаев Р.С., Черкаев Г.В. Атмосферостойкие системы покрытия для судостроительной верфи/ Морские интеллектуальные технологии // 2021. №1 т.2. С.75-79.
16. Cartledge G. H., Free Energies of Formation of Hydrous Oxides of Technetium in Its Lower Valencies // J. Electrochem. Soc. - 1971, Vol. 118, P. 1752.
17. Спицын В.И., Розенфельд И.Л., Персицанцева В.П., Замошникова Н.Н., Кузина А.Ф. - В. кн.: Коррозия металлов и сплавов. М.: Металлургиздат, 1961, с. 129.

#### References

1. Rosenfeld I.L. Corrosion inhibitors - M. Chemistry. 1977. 150S.
2. Clinton E. Ballou, Hermann O.L. Fischer, D.L. McDonald. The pertechnetate Ion As An Inhibitor of Corrosion// J. Amer. Chem. Soc. - 1955. Vol. 77. P. 2658.
3. Carl B. Wootten. Patent №4017370 [US]. Method for prevention of fouling by marine growth and corrosion utilizing Technetium-99. According to application №. 473691, Priority. 28.05.1974, published. 12.04.1977.
4. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [Au] 506551. 1980.
5. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [Ca] 1126497. 1982.
6. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [GB] 152669. 1978.
7. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [PT] 66090. 1977.
8. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [ZA] 7732. 1977.
9. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [IT] 1077269. 1985.
10. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [FR] 2378103. 1978.
11. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [ES] 455152. 1978.
12. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [DE] 2701032. 1978.
13. Carl B. Wootten. (Country, number of title of protection, year of publication) - [CH] 608249. 1978.

14. E.I. Plaskeeva, V.I. Trusov Inhibited Composition for work in marine condition. E3S Web of Conferences. Vol. 121 02011 (2019). International Conference «Corrosion in the Oil and Gas Industry» Saint-Petersburg, Russia May 22-24, 2019.
15. Ekaterina I. Plaskeeva, Daria A. Polyanskaya, Valery I. Trusov, Rustam S. Khodjaev, Georgy V. Cherkaev Atmospheric resistance coating systems for shipboard yard// 2021. №1 Vol.2. S.75-79.
16. Cartledge G.H., Free Energies of Formation of Hydrous Oxides of Technetium in Its Lower Valencies // J. Electrochem. Soc. - 1971, Vol.118, P.1752.
17. V.I. Spitsyn, I.L. Rozenfel'd, V.P. Persitsantseva, N.N. Zamoshnikova, and A.F. Kuzina, Russ. – V. book: Corrosion of metals and alloys. Moscow: Matallurgizdat, 1961, S. 129.

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

**Рустам Саломович Ходжаев**, ассистент кафедры химии, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [xodzhaev.rustam@yandex.ru](mailto:xodzhaev.rustam@yandex.ru)

**Rustam S. Khodjaev**, Assistant lecturer of the department of Chemistry, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [xodzhaev.rustam@yandex.ru](mailto:xodzhaev.rustam@yandex.ru)

**Анна Павловна Сахоненкова**, научный сотрудник лаборатории фундаментальной радиохимии, АО «Радиевый институт им.В.Г.Хлопина», 194021 Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр. 28, e-mail: [anna\\_shishkina@khlopin.ru](mailto:anna_shishkina@khlopin.ru)

**Anna P. Sakhanenkova**, Researcher at the Laboratory of Fundamental Radiochemistry, V.G. Khlopin Radium Institute, 2nd Murinsky prospect , 28, St. Petersburg, 194021, Russian Federation, e-mail: [anna\\_shishkina@khlopin.ru](mailto:anna_shishkina@khlopin.ru)

**Валерий Иванович Трусов**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [vtrui2008@mail.ru](mailto:vtrui2008@mail.ru)

**Valery I. Trusov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Chemistry, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [vtrui2008@mail.ru](mailto:vtrui2008@mail.ru)

**Александр Евгеньевич Мирославов**, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник отделения технологии изотопов, АО «Радиевый институт им.В.Г.Хлопина», 194021 Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр. 28, e-mail: [amiroslavov@khlopin.ru](mailto:amiroslavov@khlopin.ru)

**Alexander E. Miroslovov**, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Chief Researcher, Department of Isotope Technology, V.G. Khlopin Radium Institute, 2nd Murinsky prospect , 28, St. Petersburg, 194021, Russian Federation, e-mail: [amiroslavov@khlopin.ru](mailto:amiroslavov@khlopin.ru)

**Анжела Алексеевна Грибанькова**, доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры химии, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [agribankova@mail.ru](mailto:agribankova@mail.ru)

**Angela A. Gribankova**, Dr. Sci. (Edu), Professor, assistant professor, Professor of the Department of Chemistry, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [agribankova@mail.ru](mailto:agribankova@mail.ru)

**Екатерина Ивановна Плассеева**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры химии, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [ekaterina.plaskeeva@list.ru](mailto:ekaterina.plaskeeva@list.ru)

**Ekaterina I. Plaskeeva**, Ph.D. (Eng), senior lecturer of the Department of Chemistry, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [ekaterina.plaskeeva@list.ru](mailto:ekaterina.plaskeeva@list.ru)

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 23.08.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.09.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 29.09.2022.

Научная статья

УДК 629.5.081+658.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.006>

## Технологические особенности и перспективы применения полимерных композиционных материалов при постройке судов

А.В. Фирсова<sup>1</sup> [firsova-a-v@mail.ru](mailto:firsova-a-v@mail.ru), М.Ю. Щигорцов<sup>1</sup> [shchmy@yandex.ru](mailto:shchmy@yandex.ru)

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

**Аннотация** Актуальность данной темы определена перспективностью применения полимерных композиционных материалов для судостроения. В данной статье приведены обобщенные результаты исследований, направленных на сравнение преимуществ конструкций из полимерных композиционных материалов и стали. В начале статьи кратко дается историческая справка, формирующая представление об истоках использования рассматриваемых материалов в различных отраслях промышленности. В основной части статьи авторами были подробно рассмотрены особенности и выполнен анализ технологических процессов изготовления и сборки корпусных конструкций. Также в рамках статьи определены виды полимерно-композиционных материалов, которые имеют наибольшее применение в судостроении, элементы конструкций судна и виды судостроительных изделий, в изготовлении которых допускается использование полимерных композитов. Приведены факторы, ограничивающие спектр применения полимерных композитных материалов в судостроительных целях. Одним из разделов исследования является рассмотрение вопросов моделирования при проектировании и разработке конструкторских и технологических решений в процессе создания конструкций из полимерных композиционных материалов, в рамках которого предложена схема движения информации и процессов моделирования, обеспечивающая типовое движение по обязательным этапам проработки проектов и поддержки производства изделий, а также корректировку ошибок и вариантную проработку мероприятий и действий различного масштаба и уровня.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, полимерно-композиционные материалы, полимеры, стеклопластик, композитный корпус, композитное судостроение, судостроение, технология, эксплуатация

**Для цитирования:** Фирсова А.В., Щигорцов М.Ю. Технологические особенности и перспективы применения полимерных композиционных материалов при постройке судов. 2022. № 4 часть 2, С. 58—66.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.006>

## Technological features and prospects for the use of polymer composite materials in the construction of ships

Anna V. Firsova<sup>1</sup> [firsova-a-v@mail.ru](mailto:firsova-a-v@mail.ru), Mikhail Y. Shchigortsov<sup>1</sup> [shchmy@yandex.ru](mailto:shchmy@yandex.ru)

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

**Abstract.** The relevance of this topic is determined by the prospects of using polymer composite materials for shipbuilding. This article summarizes the results of research aimed at comparing the advantages of structures made of polymer composite materials and steel. At the beginning of the article, a historical reference is briefly given, forming an idea of the origins of the use of the materials in question in various industries. In the main part of the article, the authors considered in detail the features and analyzed the technological processes of manufacturing and assembly of hull structures. The article also identifies the types of polymer-composite materials that are most used in shipbuilding, structural elements of the vessel and types of shipbuilding products in the manufacture of which the use of polymer composites is allowed. The factors limiting the range of application of polymer composite materials for shipbuilding purposes are given. One of the sections of the study is the consideration of modeling issues in the design and development of design and technological solutions in the process of creating structures from polymer composite materials, within which a scheme of information movement and modeling processes is proposed, providing typical movement through the mandatory stages of project development and product production support, as well as error correction and variant elaboration of measures and actions of various scale and level.

**Keywords:** composite materials, polymer-composite materials, polymers, fiberglass, composite hull, composite shipbuilding, shipbuilding, technology, operation

**For citation:** Anna V. Firsova, Mikhail Y. Shchigortsov, Technological features and prospects for the use of polymer composite materials in the construction of ships, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 58—66.

Композиционными материалами (КМ) называют искусственно созданные материалы, в составе которых содержится от двух компонентов и более, при этом сохраняется индивидуальность каждого из

компонентов, различных по составу, но получаемый материал имеет запроецированные требуемые свойства.

Таблица 1

**Классификация КМ по признаку геометрии**

|                     |  |
|---------------------|--|
| Армирующие элементы | Композиционные материалы   |
| Порошки             | Порошковые - дисперсно-упрочненные КМ  |
| Волокна             | Волокнистые - КМ, армированные непрерывными и дискретными волокнами                    |
| Пластины            | Пластинчатые - слоистые КМ, состоящие из чередующихся непрерывных и дискретных пластин |

Внедрение полимерных и композиционных материалов является одним из приоритетов инновационного развития судостроения. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе армирующих материалов различной химической природы и полимерных матриц в виде реактопластов – полиэфирных и винилэфирных смол были внедрены и широко используются для изготовления корпусных конструкций, таких как обшивка корпуса, надстройки, палубы, переборки, конструктивные соединения и крышки.

До недавнего времени основной базой судостроительной промышленности была черная и цветная металлургия, которая производит стали и сплавы с хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью. Эти материалы обеспечивают высокую конструктивную прочность деталей машин, конструкций и механизмов. В настоящее время композитные материалы все чаще используются в качестве конструктивных материалов. Новый этап в судостроении начался с замены материалов прошлого поколения на композиционные.

В Германии в конце 30-х годов XX века впервые применили поливинилхлорид для изготовления трубопроводов, а затем и в производстве деталей мебели и переборок использовали армированный асбестом прессованный композит.

Рассматривая историю стеклопластика, немного обратимся к предыстории. По данным некоторых источников впервые стеклянные нити стали использовать во Франции для изготовления бижутерии в 30-х годах XIX века. В том же столетии технология перетекла в производство одежды, а в 30-е года XX века стекловолокно впервые получило применение в промышленных целях, в частности, для изоляции. Совсем немного времени спустя, в конце 40-х, стеклопластик пришел и в судостроение.

Возможность и необходимость применения полимерных композитов для судостроительных целей, в первую очередь, объясняется эксплуатационными свойствами материалов, таких как коррозионная стойкость, а не экономией.

Со временем были установлены и высокие удельные механические характеристики, возможность снижения количества деталей в составе конструкций, тем самым повышая герметичность посредством минимизации узлов соединений.

Помимо повышения уровня механических свойств изделий, полимерные композиты дали возможность получить более сложные формы, что повысило технологичность производств.

Стоит отметить важное технологическое достижение, связанное с возможностью колеровки материалов в процессе приготовления состава связующего добавлением пигмента.

В отечественном судостроении с 60-х годов прошлого века наблюдается устойчивая тенденция к использованию композиционных материалов, особенно для строительства палубных конструкций, требующих снижения веса и улучшения свойств конструкции. Стеклопластиковые материалы могут быть использованы для строительства различных несущих конструкций коммерческих судов в случае, когда отклонение от обычных материалов оправдано коррозионной стойкостью, весом или сложными формами [1-3].

Композиционные материалы обладают высокой удельной прочностью и жесткостью, термостойкостью, износостойкостью и теплозащитными свойствами. Перечисленные выше свойства композитов затруднительно получить при использовании обычных материалов. С появлением композитов судостроительная промышленность обрела принципиально новые возможности для создания новых конструкций, которые ранее были недоступны.

Кроме преимуществ композитных материалов, таких как – немагнитность, высокие показатели удельной прочности, жесткости, износостойкости и усталостной прочности, существуют и недостатки. К недостаткам композитов относятся высокая стоимость, анизотропия свойств (композиционные материалы, волокна которых ориентированы в определенных направлениях), повышенная наукоемкость производства, полное или частичное отсутствие отечественных сырьевых компонентов, а также необходимость в дорогостоящем оборудовании и сырье.

В основном стекло и углепластики используются для строительства прогулочных и спортивных судов и судостроительной продукции. При строительстве судов, длиной свыше 30 метров стеклопластик используется крайне редко.

В таблицах 2-4 приведены сравнительные показатели ПКМ и других материалов.

В таблице 2 представлены данные сравнения толщины ПКМ и стали при одинаковом максимальном прогибе и при максимальных напряжениях.

Таблица 2

**Сравнение толщин материалов при одинаковых максимальных прогибах и напряжениях**

| Материал | Толщина | Прогиб max | Масса    | Толщина | Напряжения max | Масса     |
|----------|---------|------------|----------|---------|----------------|-----------|
| ПКМ      | 36 мм   | 20 мм      | 29,39 кг | 36 мм   | 8,37 МПа       | 29,39 кг  |
| Сталь    | 4 мм    | 20 мм      | 63,9 кг  | 19,2 мм | 8,37 МПа       | 306,75 кг |

При проведении анализа в процессе подготовки материала к данной статье было принято решение провести сравнительный факторный анализ свойств распространенных судостроительных материалов. С

учетом специфики исследования и возможностей применения ПКМ за эталон принимается алюминиевый сплав, удельный вес был установлен экспертным методом.

Таблица 3

Факторная модель сравнения свойств стали и ПКМ

| Свойство материала  | Приоритет | Сталь  |                     | ПКМ  |                     |
|---|-----------|--|---------------------|--|---------------------|
|   |           | значение   | отклонение, % (+/-) | значение   | отклонение, % (+/-) |
| Прочность (предел прочности $s_b$ , Мпа)                      | 0,15      | 400/460  | 7                   | 700/1700   | 10                  |
| Пластичность/текучесть $sp_{0,2}$ , Мпа                       | 0,05      | 300  | 10                  | 94   | -15                 |
| Вязкость, предел удлинения, %                                 | 0,05      | 31   | 5                   | 5  | -5                  |
| Свариваемость, Сэ*  | 0,15      | сваривается без ограничений. способы сварки: РДС, АДС под флюсом и газовой защитой, ЭШС. | 0                   | сваривается с ограничениями                      | -20                 |
| Жаропрочность, °С   | 0,10      | 425°С  | -5                  | 180°С  | -10                 |
| Твердость, НВ Дж/см <sup>2</sup>                              | 0,05      | 64   | -5                  | 55   | -5                  |
| Коррозионная стойкость $S_{кр}$ , Мпа                         | 0,20      | малостойкая  | -20                 | стойкая  | 20                  |
| Легкость/Удельный вес, (г/см <sup>3</sup> )/кг/м <sup>3</sup> | 0,10      | 7850 кг/м <sup>3</sup>   | -20                 | 1,1 г/см <sup>3</sup>                            | 20                  |
| Химостойкость   | 0,10      | чувствительна  | 0                   | стойкая  | 20                  |
| Эстетичность, прочие свойства                                 | 0,05      | металлический блеск  | 5                   | склонен к образованию трещин, легко окрашивается | -10                 |
| Отклонение от условно эталонного материала +/-                | 1,00      | -  | -23                 | -  | 5                   |

Производство глубоководных, в том числе и научно-исследовательских, а также различных беспилотных аппаратов сейчас имеет важное стратегическое значение. Определяющим фактором здесь является предельная глубина погружения.

Таблица 4  
Возможности погружения аппаратов в зависимости от материала корпуса

| Материал                         | Глубина погружения, до..., м |
|----------------------------------|------------------------------|
| Высокопрочные легированные стали | 3000                         |
| Алюминиевые сплавы               | 4500                         |
| Титановые сплавы                 | 6000                         |
| ПКМ                              | 9000                         |

**Технологические и эксплуатационные особенности изготовления конструкций из стеклопластика и применения полимеров в судостроении**

Особенность изготовления конструкций из стеклопластика заключается в том, что и сам материал и изготавливаемое из него изделие создаются одновременно, что меняет роль методов изготовления конструкций из стеклопластика в проблеме их создания. Уже на этапе проектирования нужно учитывать методы изготовления конструкций и технологические особенности методов. [4] При изготовлении корпусов судов и корпусных конструкций из стеклопластиков применяются в

основном четыре распространенных в разной степени метода (рисунок 1):

**МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ И КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВ**



Рис. 1. Основные методы изготовления корпусных конструкций из стеклопластика

Корпус преимущественно изготавливают из полиэфирных стеклопластиков методом контактного формования. Если говорить о внутренних элементах конструкций из стеклопластика, то их изготавливают методами намотки или прессования.

Контактное (ручное) формование изделий из стеклопластика – это метод, заключающийся в послойной укладке материала в матрицу. В рамках данного метода на поверхность матрицы наносятся антиадгезионные покрытия и декоративно-защитный слой гелькоут, затем армирующий материал пропитывается связующим и удаляется воздушный слой прикаткой с помощью валика. По завершении процесса полимеризации изделие проходит температурную обработку, после чего извлекается из оснастки, далее происходит механическая дообработка. Контактным формованием производят прочные и легкие корпуса, обвесы и обшивки. Использование такого метода оказывает отрицательное влияние на здоровье рабочих. Достоинством метода контактного формования, является относительная простота. К средствам малой механизации данного метода относятся установки для приготовления и дозированной подачи связующего к валику, которым наносят связующее на армирующий материал, прикатывая и уплотняя его. Технология ручной формовки требует изготовления специальной оснастки, во всем прочем является малозатратной. К недостаткам технологии относятся тяжелые вредные условия труда рабочих. Контактное формование способно обеспечить изготовление судов водоизмещением до 300 т и длиной до 50 м, по данным заводов – строителей, и водоизмещением до 1000 т, длиной в 60 м, по данным научно-практических исследований и разработок.

Механизированное напыление применяется при изготовлении корпусов мелких судов и их деталей. При производстве корпусов крупных судов напыление не применяется, так как полученные напылением изделия обладают меньшей прочностью, чем формованные или прессованные. В лабораториях СПбГМТУ производятся работы по поиску оптимальных условий режимов работы напылением.

Намоткой называется процесс изготовления армированных конструкций, например, балок. В качестве армирующего материала применяют нити, жгуты, ленты или ткани, который укладывается на вращающуюся основу, определяющую внутренние геометрические параметры будущего изделия.

Из совокупности всех методов производства изделий из ПКМ наиболее прогрессивным считается прессование, при котором все операции, кроме укладки стеклоткани в форму и заливки связующего, механизированы. Прессование дает большую производительность, нежели иные методы, однако, имеет ограничивающуюся по размерам применяемой прессовой оснастки и по мощности оборудования.

Следует также отметить широкое применение различных полимерных материалов для судостроительных нужд. На рисунке 2 приведены основные сферы применения полимерных материалов в судостроении.



Рис. 2. Сферы применения полимерных материалов в судостроении

Помимо ПКМ для корпусов судов и корпусных конструкций полимерные материалы применяются также в качестве уплотнителей (изоляторов, герметиков и прокладочных).

Клеевые полимеры применяют для соединения деталей из пластмасс, приклеивания различных материалов к металлам и склеивания металлов друг с другом составами на эпоксидной основе, такие соединения называют эластичными. Для повышения качества соединения производят клеесварные соединения с применением полибутилметакрилатного клея холодного отверждения, который позволяет произвести точечную сварку сразу после нанесения.

Такой способ способствует получению вибро- и ударопрочного, химически-стойкого эластичного шва. Это - лишь немногие виды клеевых соединений.

Мастичные покрытия палуб предназначены для устранения скольжения на открытых металлических палубах, а также для защиты от коррозии.

Так называемое трансферное (с переносом смолы) формование можно разделить две технологии:

- RTM - Resin Transfer Moulding (литье с переносом смолы) – это формование в закрытую форму;
- VARTM - Vacuum assisted resin transfer molding (вакуумное формование с переносом смолы) или VIP - Vacuum infusion process (вакуумная инфузия) – это вакуумное формование в открытую форму.

В основе технология RTM заложен ввод (инжекция) смолы в закрытую форму. Оснастка включает в себя базу и ответную форму - пресс (пуансон). Получение изделия данным методом требует значительных затрат на оборудование для инъекции смолы, вспомогательное оборудование и на изготовление различной сложной оснастки для формования, поэтому применяется реже, чем вакуумная инфузия, не смотря на преимущества.

Формирование вакуумными способами по сути своей является развитием технологии ручной раскладки, в которой пропитанный смолой ламинат подвергается давлению для получения более качественной структуры при отверждении. Вакуумирование существенно повышает прочностные характеристики при обеспечении снижения массы получаемого изделия.

Также нельзя забывать и о таком преимуществе, как снижение выделение вредных веществ в атмосферу. Влажная раскладка ограничивает применение данного метода по времени на работы, так как преимущественно смолы сохраняют жидкое состояние не более 30 минут, и лишь некоторые - в течение двух часов, после чего происходит полимеризация и изделие затвердевает. Это делает технологию неудобной для работы с крупными объектами и сложными формами.

Инфузия, являющаяся разновидностью вакуумного формования – это одна из самых распространенных технологий в судостроении, основана использовании «сухого» армирующего материала. Такой метод позволяет получать ламинат с хорошим наполнением стекловолокном и высокими механическими свойствами. Технология может создавать крупные объекты, при относительно низких затратах.

На рисунке 3 представлена схема общая схема вакуумной инфузии.

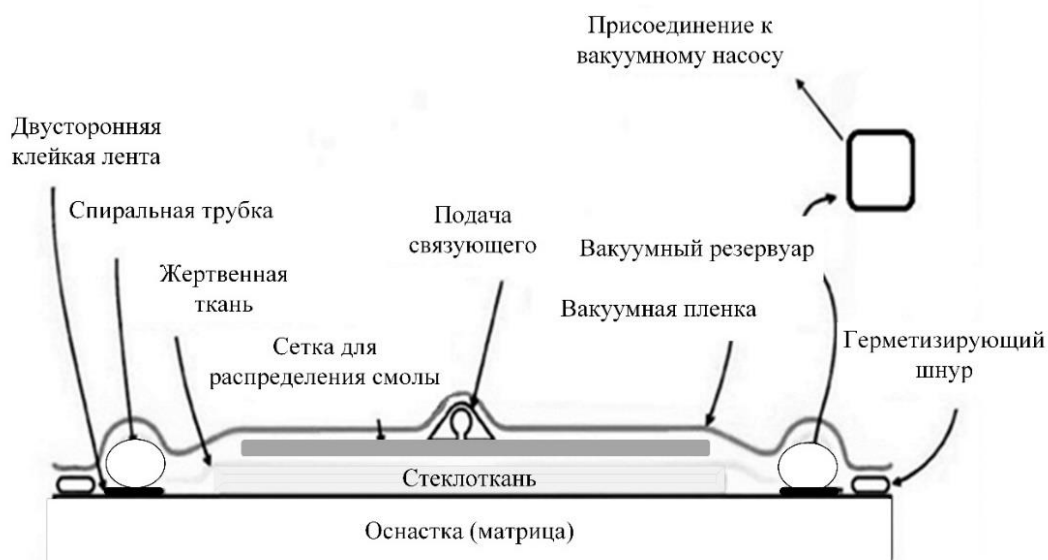


Рис. 3. Схема вакуумной инфузии

При сборке плоскостных секций из стеклопластика разрабатывается технологическая оснастка для эффективного выполнения работ и достижения требуемых характеристик изготавливаемой конструкции.

Технологическая оснастка представляет собой совокупность вспомогательных технических средств, которыми снабжается производственное оборудование для выполнения одной или нескольких операций технологического процесса.

Конструкция технологической оснастки определяется чертежами, которые разрабатывает завод-изготовитель, и должна обеспечивать следующие параметры:

- получение обводов и размеров конструкций, заданных рабочими чертежами, и данными плаза, и с учётом, при наличии, фактически выполненных конструкций металлического корпуса в районе их установки;
- жёсткость и прочность оснастки при её транспортировании и формовании конструкций;
- ремонтпригодность;
- удобство и безопасность выполнения технологических операций;
- возможность кантования секций в процессе их формования и сборки в блоки;

— возможность съёма отформованной конструкции.

Подготовка поверхности оснастки для формования методом вакуумной инфузии:

- обезжиривание поверхности матрицы производится растворителем;
- перед нанесением герметика подготовить поверхность активатором и праймером;
- герметизация швов с помощью герметика и лентой липкой;
- защита кромок шва наклеивается креп-лентой бумажной;
- обезжиривание поверхности шва ацетоном;
- перед нанесением разделительного состава подготовить поверхность оснастки средством для чистки матриц;
- для подготовки и герметизации оснастки использовать грунт;
- разделительный состав для матрицы – разделительный агент;
- организация вакуумного мешка с помощью вакуумной плёнки;
- распределение связующего по поверхности стеклопакета производится сеткой для распределения смолы.

Ниже представлена схема заполнения матрицы для формования корпуса судна (рисунок 4).

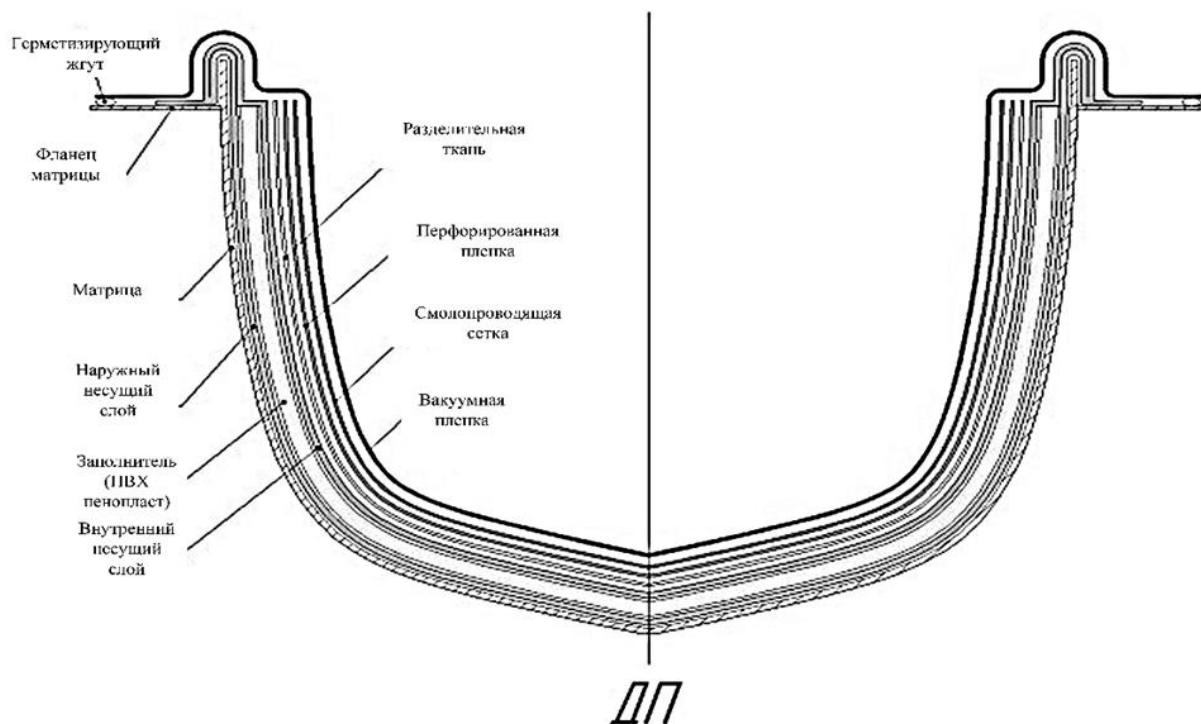


Рис. 4 Схема заполнения матрицы

Процесс изготовления корпуса судна на предприятиях выглядит аналогично, но применяемая оснастка имеет соответствующую конфигурацию.

#### Моделирование при проектировании и разработке конструкторских и технологических решений в процессе создания конструкций из ПКМ

В ходе проектной стадии разработки изделий и процессов их производства требуется принимать обоснованное решение о выборе армирующих материалов, связующего, способах укладки, изготовлении оснастки и прочем. Также перед крупными предприятиями всегда стоит задача обеспечения всех видов подготовки производства, сопровождающихся большим количеством документации, а также зачастую сложным моделированием процессов. Взаимодействие имеющегося на текущий момент времени принятого решения с линиями корректирующих действий или целых программ корректировок в аспекте вариативности ожидаемых событий – это одна из важнейших задач, стоящих перед современными разработчиками программного обеспечения для производственных предприятий крупной промышленности

В первую очередь, такие корректирующие программы несут в себе функцию снижения риска возникновения брака на различных этапах изготовления продукции, срыва сроков поставок и нарушения нормального течения производственных циклов. А в самых смелых мечтах полная и постоянно пополняемая база программного решения, обеспечивающая комплексную поддержку производства, позволит пользоваться конфигуратором готовых параметров и предопределяющими алгоритмами действий в тех или иных меняющихся и нечетких условиях. [1]

Для проведения полного анализа материалов и технологических решений существует ряд предложений САПР, которые моделируют параметры будущего изделия, подбирают оптимальные материалы и формируют принципиальную технологию производства. Такие решения, безусловно, полезны для проектно-конструкторских организаций и пользователей частного бизнеса, но не являются комплексными для крупных производственных предприятий. Поэтому предлагается укрупненная схема работы комплексного программного решения (рисунок 5).



Рис. 5 Цикл виртуального моделирования изделий и процессов

В рамках предлагаемой модели предполагается как минимум двойной условный контур движения информации и процессов моделирования. Внутренний контур – это типовое движение по обязательным этапам проработки проектов и поддержки производства изделий. Внешний контур – куда более сложная система, которая позволит корректировать ошибки и создавать запасные варианты действий различного масштаба и уровня.

Если внутренний контур просто складывает имеющиеся по сути на данный момент «кусочные» программные продукты, которые в совокупности представляют собой автоматизированную систему для поддержки принятия решений и документационного сопровождения на различных стадиях производства, то внешний корректирующий и прогнозирующий контур – это уже продукт более глубокого цифрового моделирования [5-8]. Чем больше этот контур будет содержать различных методик и алгоритмов, чем больше он будет проходить циклов обмена, анализа, систематизации и аккумуляирования решений, тем больше возможностей для устранения ошибок даст программное решение в будущем. [9]

**Подводя итоги, следует отметить следующее:**

Доминирующее и лимитирующее свойство композитов в судостроении - это взаимоотношение с водой. Иными словами, большое влияние при применении композиционных материалов оказывает воздействие воды, в частности, именно морской, на изменение их свойств. Полимерные материалы напитывают (абсорбируют) воду, которая оказывает отрицательное воздействие на механические характеристики в среднем 10÷15 %. В перспективе развития данного направления приоритетным становится разработка композитного материала максимальной плотности.

Пластик, армированный углеродными волокнами, является более перспективным для судостроения, так как модуль упругости его выше, чем у стеклопластика, а также он обладает меньшей плотностью и большей усталостной выносливостью. [10] Примером может служить корпус катамарана "Гриффон" из углеродного композита.

Немагнитность стекло- и углепластиков делает их преимущественными для постройки тральщиков и других военных кораблей.

Современные конструкции судов из ПКМ, как правило, вдвое легче стальных, что должно позволить соответственно сократить расход топлива или увеличить грузоподъемность (вместимость) судна. Однако, установка противопожарной изоляции, утяжеляет конструкции и снижает данный эффект. При сравнении весовых характеристик конструкций из композиционных материалов и легких сплавов, стекловолокно при эквивалентной прочности в большинстве изделий преимущества не обеспечивает, в отличие от углеродного волокна. Доступные методики проектирования судовых корпусных конструкций из углепластика на текущий момент только разрабатываются, а эксплуатационное поведение и характеристики долговечности судов из углепластика также находятся в процессе установления. [2]

По технологии, разработанной ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», на Средне-Невском судостроительном заводе к середине второй декады нового века было освоено изготовление из ТС ПКМ трехъярусных надстроек массой более 70 тонн проекта типа «Корвет».

Использование современных КМ при строительстве крупногабаритных судов в будущем должно снизить затраты на изготовление и

обслуживание, улучшить дизайн конструкции, снизить вес оснастки и повысить надежность судна.

Эксплуатационные расходы на стеклопластиковые рыболовные суда, для

сравнения, составляют 20-30% от деревянных, технологичность и получаемые свойства изделий делают данные материалы привлекательными для владельцев.

#### Литература

1. Апполонов, Е. М. Полимерные композиционные материалы. Инновации в промышленности / Е. М. Апполонов, Н. Н. Федонюк, В. М. Шапошников // Инновации. – 2013. – № 11(181). – С. 18-20. – EDN SUDPMV;
2. Руденко, Э. В. Применение композиционных материалов в судостроении / Э. В. Руденко // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ. Материалы конференции. Сборник докладов. В 6-ти томах, Казань, 10–11 ноября 2021 года. – Казань: Индивидуальный предприниматель Сагиева А.Р., 2021. – С. 562-565. – EDN PCDUDQ;
3. Холодников, Ю. В. Нет пророка в своем отечестве! Или еще раз о промышленных композитах / Ю. В. Холодников // Композитный мир. – 2021. – № 4(97). – С. 34-35. – EDN KYGERJ;
4. Францев, М. Э. Оценка целесообразности применения 3D-печати в маломерном композитном судостроении / М. Э. Францев // Композитный мир. – 2021. – № 1(94). – С. 48-53. – EDN TJLRIF;
5. Туричин Г.А. Проект глубокой модернизации АО "Онежский судостроительно-судоремонтный завод" в целях создания "цифровой верфи" / Г. А. Туричин, В. Н. Киреев, А. В. Березовский [и др.] // Судостроение. – 2021. – № 5(858). – С. 80-87. – DOI 10.54068/00394580\_2021\_5\_80. – EDN PPAASC;
6. Васильев, А. А. Перспективы внедрения современных технологий на предприятиях речного судостроения / А. А. Васильев, Н. К. Трубецкой // Судостроение. – 2018. – № 5(840). – С. 21-24. – EDN YMCEAX;
7. Габдрафиков, Ю. М. Основные проблемы и задачи при организации цифрового производства на отечественных судостроительных верфях / Ю. М. Габдрафиков, В. М. Левшаков, А. А. Васильев // Судостроение. – 2019. – № 4(845). – С. 44-52. – EDN MGBFQL;
8. Киселева, А. Е. Цифровая трансформация судостроительных предприятий в обеспечение строительства перспективной морской техники / А. Е. Киселева // Судостроение. – 2022. – № 1(860). – С. 54-57. – EDN MFWXHE;
9. Фирсова А.В., 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;
10. Яковлев, Н. О. Оценка геометрических параметров углеродных волокон / Н. О. Яковлев, А. И. Гуляев, Е. А. Попкова // 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. 227-239. – EDN NVXEJS.

#### References

1. Appolonov, E. M. Polymer composite materials. Innovations in industry / E. M. Appolonov, N. N. Fedonyuk, V. M. Shaposhnikov // Innovations. – 2013. – № 11(181). – Pp. 18-20. – EDN SUDPMV;
2. Rudenko, E. V. Application of composite materials in shipbuilding / E. V. Rudenko // XXV Tupolev Readings (school of Young Scientists): International Youth scientific conference dedicated to the 60th anniversary of the First human flight into Outer space and the 90th anniversary of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Conference materials. Collection of reports. In 6 volumes, Kazan, November 10-11, 2021. – Kazan: Individual entrepreneur Sagieva A.R., 2021. – pp. 562-565. – EDN PCDUDQ;
3. Kholodnikov, Yu. V. There is no prophet in his fatherland! Or once again about industrial composites / Yu. V. Kholodnikov // Composite world. – 2021. – № 4(97). – Pp. 34-35. – EDN KYGERJ;
4. Frantsev, M. E. Evaluation of the feasibility of using 3D printing in small-scale composite shipbuilding / M. E. Frantsev // Composite world. – 2021. – № 1(94). – Pp. 48-53. – EDN TJLRIF;
5. Turichin G.A. The project of deep modernization of JSC "Onega Shipbuilding and ship repair Plant" in order to create a "digital shipyard" / G. A. Turichin, V. N. Kireev, A.V. Berezovsky [et al.] // Shipbuilding. – 2021. – № 5(858). – Pp. 80-87. – DOI 10.54068/00394580\_2021\_5\_80. – EDN PPAASC;
6. Vasiliev, A. A. Prospects for the introduction of modern technologies at river shipbuilding enterprises / A. A. Vasiliev, N. K. Trubetskoy // Shipbuilding. – 2018. – № 5(840). – Pp. 21-24. – EDN YMCEAX;
7. Gabdrifakov, Yu. M. The main problems and tasks in the organization of digital production at domestic shipyards / Yu. M. Gabdrifakov, V. M. Levshakov, A. A. Vasiliev // Shipbuilding. – 2019. – № 4(845). – Pp. 44-52. – EDN MGBFQL;
8. Kiseleva, A. E. Digital transformation of shipbuilding enterprises in ensuring the construction of promising marine equipment / A. E. Kiseleva // Shipbuilding. – 2022. – № 1(860). – Pp. 54-57. – EDN MFWXHE;
9. Firsova A.V., 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;
10. Yakovlev, N. O. Evaluation of geometric parameters of carbon fibers / N. O. Yakovlev, A. I. Gulyaev, E. A. Popkova // 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

year. – Moscow: All-Russian Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center "Kurchatov Institute", 2022. – pp. 227-239. – EDN NVXEJS.

**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 shipbuilding technology, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: firsova-a-v@mail.ru

**Михаил Юрьевич Щигорцов**, старший преподаватель кафедры технологии судостроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: firsova-a-v@mail.ru

**Mikhail Y. Shchigortsov**, senior lecturer of shipbuilding technology, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: shchmy@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.08.2022.

Научная статья

УДК 621.767.53.082

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.007>

## Имплементация цифровых технологий размерного контроля на отечественных верфях

А.В. Догадин<sup>1</sup> [aww\\_dg@mail.ru](mailto:aww_dg@mail.ru), В.В. Дубинка<sup>2</sup> [vdoubynka@bumt.spb.ru](mailto:vdoubynka@bumt.spb.ru),

В.А. Рогозин<sup>3</sup> [rogozin.VA@ashipyards.com](mailto:rogozin.VA@ashipyards.com),

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

<sup>2</sup> Бум Техно, <sup>3</sup>Адмиралтейские верфи

**Аннотация.** В статье рассматривается одно из важных направлений совершенствования технологии корпусостроения, а именно, обеспечение повышения точности изготовления, сборки и монтажа отдельных корпусных конструкций и корпуса судна в целом с использованием современного подхода на базе размерного контроля процесса постройки судна. Анализируются основные этапы развития технологии размерного контроля на базе различных электронно-оптических и лазерных измерительных систем. Приводятся примеры успешного применения этой технологии на российских судостроительных предприятиях, которые позволили оценить эффективность этой технологии и установить область ее рационального применения для конкретных случаев. Рассмотрены направления и задачи дальнейшего развития этого важного элемента технологии корпусостроения включая технические и организационные аспекты внедрения технологии размерного контроля на судостроительных предприятиях, совместную работу инженеров проектных организаций и технологических служб заводов, соответствующую подготовку кадрового обеспечения.

**Ключевые слова:** электронно-оптические измерительные системы, контуровка, размерный контроль, припуска, проверочные работы, методика измерений, система баз, чистый размер.

**Для цитирования:** Догадин А.В., Дубинка В.В., Рогозин В.А. Имплементация цифровых технологий размерного контроля на отечественных верфях. Морские интеллектуальные технологии 2022. № 4 часть 2, С. 67—71.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.007>

## Implementation of digital technologies for dimensional control at domestic shipyards.

Alexandr V. Dogadin<sup>1</sup> [aww\\_dg@mail.ru](mailto:aww_dg@mail.ru), Vladimir V. Dubinka<sup>2</sup> [vdoubynka@bumt.spb.ru](mailto:vdoubynka@bumt.spb.ru),

Vladimir A. Rogozin<sup>3</sup> [rogozin.VA@ashipyards.com](mailto:rogozin.VA@ashipyards.com)

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, <sup>2</sup>Boom Techno, St. Petersburg, Russian Federation, <sup>3</sup>Admiralty Shipyards, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article considers one of the important directions of improving the technology of hull construction, namely, ensuring an increase in the accuracy of manufacturing, assembly and installation of individual hull structures and the hull of the vessel as a whole using a modern approach based on dimensional control of the vessel construction process. The main stages of the development of dimensional control technology based on various electron-optical and laser measuring systems are analyzed. Examples of successful application of this technology at Russian shipbuilding enterprises are given, which made it possible to evaluate the effectiveness of this technology and to establish the scope of its rational application for specific cases. The directions and tasks of further development of this important element of hull construction technology are considered, including technical and organizational aspects of the introduction of dimensional control technology at shipbuilding enterprises, the joint work of engineers of design organizations and technological services of factories, appropriate training of personnel support

**Keywords:** electron-optical measuring systems, contouring, dimensional control, allowance, verification work, measurement technique, base system, net size.

**For citation:** Alexandr V. Dogadin, Vladimir V. Dubinka, Vladimir A. Rogozin. Implementation of digital technologies for dimensional control at domestic shipyards. Marine intelligent technologies. 2022. № 4 part 2. P. 67—71.

Одной из важных тенденций совершенствования современных производственных процессов в судостроении является общее повышение точности изготовления, сборки и монтажа, как отдельных элементов, так и судна в целом.

В таких «аккуратных» методах производства (neat production methods) к технологиям размерного контроля предъявляются повышенные требования, как по точности, так и по информационной насыщенности. Традиционно применяемые методы и

средства геометрических измерений этим требованиям не соответствуют.

В 90-х годах прошедшего века рядом отраслевых организаций (Севмашпредприятие, ЛКИ, ЦНИИ ТС, Малахит) был проведен комплекс НИОКР по разработке технологий размерного контроля на основе координатных методов измерений с использованием электронно-оптических и лазерных измерительных систем [1], [2], [3], [4], [5].

В эти же годы, на базе Севмашпредприятия и Адмиралтейских верфей с использованием электронно-оптических измерительных систем, был

выполнен ряд работ по размерному контролю штатных конструкциях. Выполнить эти работы традиционными методами и средствами измерений не представлялось возможным [6], [7],[8].

Так был заложен базис для создания комплексных высокоточных «аккуратных» технологий постройки судов на отечественных верфях.

На основе вышеуказанных достижений в начале нулевых годов специалистами Адмиралтейских верфей и фирмы Бум Техно была разработана комплексная технология, которая гарантировала формирование корпуса судна из секций, изготовленных в «чистый» размер, то есть без припусков и с повышенной точностью обводов (Рис. 1). В 2001 г. были проведены опытные работы

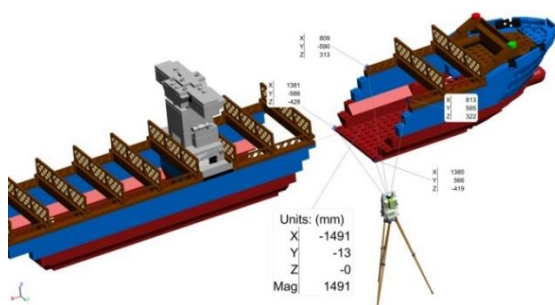


Рис. 1 Схема дистанционного причерчивания стыкуемых конструкций

на штатных конструкциях одного из танкеров проекта 20071, по дистанционному причерчиванию корпусных секций по результатам обмеров корпуса на месте её будущей установки с помощью координатно-измерительных систем (рис.1).

Опыт работы показал, что данный метод эффективен для секций кормовой и носовой оконечностей, имеющих сложные монтажные соединения с несколькими ранее установленными секциями, но не пригоден для секций средней части корпуса. Потому что, время снятия размеров с корпуса, расчёт величин удаляемых припусков, нанесение линий контуровки зачастую превышало технологический разрыв между изготовлением секции и установкой её на стапеле. К тому же этот способ накладывал ограничение на проведение работ в месте установки контуруемой секции.

К началу строительства серии из восьми танкеров проекта 05-55 были разработаны основные принципы изготовления и установки секций танковой части из деталей, не имеющих припусков с применением фиксированных контрольных линий [9]. Данный метод позволил объективно оценивать отклонения элементов секций при изготовлении, и предполагаемое несовпадение их на стапеле. К началу строительства второго заказа в серии были переработаны в сторону ужесточения допустимые отклонения на форму и размеры секций, предполагающие среднее вероятное несовпадение элементов секций на стапеле в пределах 10мм

Созданная технология размерного контроля позволила Адмиралтейским верфям оптимизировать производственный процесс формирования корпуса судна на основе машиностроительных принципов взаимозаменяемости [10]:

- Система баз и размерная увязка выполняются на стадии проектирования и закладывается в рабочих чертежах.

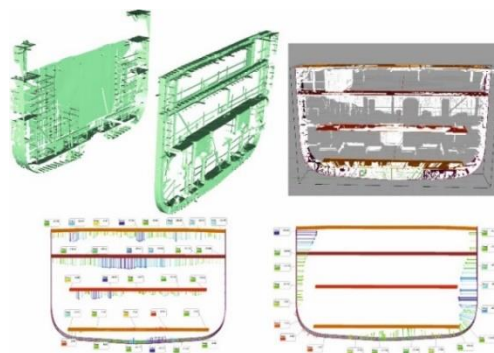


Рис.2 Схема отклонений размеров корпусных конструкций от данных 3D модели

- Элементы секций (детали обшивки и набора) изготавливаются без припусков.
- Размерный мониторинг проводится на всех этапах изготовления судовых конструкций и при формировании корпуса на стапеле – реализуя идеологию «сквозного» размерного контроля (РК).
- Высокая точность изготовления секций позволяет формировать судно на стапеле с минимальным объёмом пригоночных операций [11].



Рис. 3 Пример размерного контроля при установке поперечной переборки на стапеле

Следует отметить, что впервые в самом конце 90-х годов в российском судостроении координатно-измерительные системы применили на предприятии Звёздочка. Разработанная на основе координатных методов измерений технология размерного контроля позволила заводу успешно выполнить непростой заказ по изготовлению наружных стеллажей трубопроводов для газодобывающей платформы ASGARD-B.

Позже уже в начале века XXI на Звёздочке имплементированы интегрированные технологические и метрологические решения при постройке СПБУ «Арктическая».

Разработанная технология сквозного размерного контроля методами координатных измерений на всех этапах постройки СПБУ «Арктическая» включала:

- размерно-технологический анализ собираемости СПБУ на плаву;

- дистанционное причерчивание конструкций понтонов и бортовых аутригеров для обеспечения их стыкования на плаву без «контрольной» сборки - отказ от работ в бассейне Севмашпредприятия [11];
- формирование аутригеров и порталов;
- монтаж направляющих опорных колонн;
- изготовление секций опорных колонн в «чистый» размер;
- формирование опор на плаву без подгонки.



Рис. 4 Общий вид понтона СПБУ «Арктическая»

Дальнейшее развитие технологии проверочных работ сопровождалось приобретением отечественными судостроительными заводами современных измерительных приборов и программного обеспечения, созданием групп размерного контроля. Эти группы качественно в лучшую сторону отличались от традиционных бригад судовых проверщиков, имеющих в стапельных цехах многих предприятий. Вновь создаваемые группы изначально были нацелены на решение производственных задач, чем отличались и от лабораторий линейно-угловых измерений, входящих в службу главного метролога.

Важной задачей в настоящее время является необходимость дальнейшего технического развития и организационного совершенствования обеспечения и набор людей. Необходимо создавать централизованные службы размерного контроля, в которых сосредоточены инженерные силы по судовым проверочным работам, которые действуют независимо от других технических служб,

обеспечивают качественный «сквозной» размерный контроль на всех этапах строительства и сдачи судна и отвечают за все аспекты деятельности предприятия в области размерного контроля.

Задача заключается не только в выполнении физического объема работ по судовым проверочным операциям с применением электронно-оптических систем и консультациях по методам координатных измерений, но в создании системы обеспечения качества изготовления и сборки судовых конструкций, монтажа механизмов и систем в условиях предприятия, обеспечивающих сокращение сроков постройки судов. Это должен быть совместный труд инженерных служб и производственных структур завода.

Правильно организованная служба размерного контроля предполагает в своём составе наличие не только инженеров-измерителей, но и инженеров, способных разрабатывать методики измерений и создавать современные технологии размерного контроля.

В случае недостатка собственных компетенции возникает необходимость привлечения сторонних организаций. Предпочтение нужно отдавать компаниям, предлагающим не только поставки приборов, оснастки и программных продуктов, но и конкретные метрологические и технологические решения, а также совместное со специалистами предприятия выполнение штатных работ на начальных этапах имплементации технологий размерного контроля. Такие организации не только выполняют работы на заводах, где нет групп размерного контроля, но сотрудничают и с заводами, где они есть в случае освоения новых измерительных технологий или для решения задач, которые заводы сами решить не могут.

Накопленный опыт позволяет авторам предлагать интегрированные технологические и метрологические решения для обеспечения судостроительных и судоремонтных работ на предприятиях отрасли, требующих размерного контроля и мониторинга.

В настоящее время вопросы размерного контроля рассматриваются и в процессе обучения студентов в курсах технологии судостроения, создавая и кадровое обеспечение этого важного вопроса.

#### Литература

1. Дубинка В.В. Бесконтактные методы координатных измерений при строительстве и эксплуатации буровых платформ "Росшельфа". Материалы 1-й Международной конференции по освоению шельфа арктических морей России - RAO'93. СПб, 1993, с.176.
2. Дубинка В.В. Метод бесконтактного контроля геометрической формы и пространственного положения крупногабаритных судовых конструкций и изделий сложной формы с использованием теодолитных измерительных систем. Материалы Международной конференции по судостроению (ISC'94). СПб, 1993. с.151-158.
3. Дубинка В.В. Опыт применения методов бесконтактных координатных измерений на основе электронных теодолитных систем для определения фактических баз крупногабаритных конструкций. Материалы Международной конференции к 300-летию Российского флота - Военно-морской флот и судостроение в современных условиях (NSN-96). СПб, 1996.
4. Догадин А.В., Изаренков О.В., Соколов В.Ф. Оптико-электронные измерительные системы. Зарубежный опыт. Технология судоремонта, 1995. №2.
5. Догадин А.В., Изаренков О.В., Соколов В.Ф. К вопросу о выполнении проверочных корпусных работ. Зарубежный опыт. Технология судоремонта, 1996, № 1.
6. Дубинка В.В. Особенности разработки проектной технологии размерного контроля крупногабаритных конструкций офшорных сооружений на примере МЛСП "Приразломная". Материалы Второй международной конференции по судостроению ISC'98). СПб, 1998.

7. Дубинка В.В. Исследование возможностей снижения коэффициентов запаса прочности судовых конструкций за счет высокоточного контроля геометрии координатными методами с помощью электронно-оптических измерительных систем. Материалы Второй международной конференции по судостроению - ISC'98. СПб, 1998.
8. Дубинка В.В. Создание технологии бесконтактного контроля геометрических параметров крупногабаритных конструкций промышленных объектов с помощью теодолитных измерительных систем. Сборник трудов НТО, 1997 г., № 1
9. Дубинка В.В., Rogozin V.A. «Адмиралтейские верфи» используют при постройке танкеров аккуратные технологии. Морская биржа, 2002, № 1
10. Дубинка В.В. Современные технологии размерного контроля в судостроении и судоремонте с использованием электронно-оптических координатных измерительных систем. Морская биржа, 2003, № 2
11. Дубинка В.В. Проверка на стапелях. www.Korabel.ru / Выпуск 2 (28) / Август 2015

#### References

1. Dubinka V.V. Beskontaktnye metody koordinatnykh izmerenij pri stroitelstve i ekspluatazii burovnykh platform "Rosshelfa" [Contactless methods of coordinate measurements in the construction and operation of drilling platforms "Rosshelf"]. Materialy 1-j Megdunarodnoj konferencii po osvoeniju shelfa arkticheskikh morei Rossii RAO'93. SPb, 1993, s.176.
2. Dubinka V.V. Metod beskontaktnogo kontrolja geometricheskoi formy i prostranstvennogo pologenija krupnogabaritnykh sudovykh konstrukcij i izdelij sloznoj formy s ispol'zovaniem teodolitnykh izmeritel'nykh sistem [The method of contactless control of the geometric shape and spatial position of large-sized ship structures and products of complex shape using theodolite systems]. Materialy Megdunarodnoj konferencii po sudostroeniju (ISC'94). SPb, 1993. s.151-158.
3. Dubinka V.V. Opyt primeneniya metodov beskontaktnykh koordinatnykh izmerenij na osnove elektronnykh teodolitnykh sistem dlia opredelenija fakticheskikh baz krupnogabaritnykh konstrukcij [Experience in using methods of contactless coordinate measurements based on electronic theodolite systems to determine the actual bases of large-sized structures]. Materialy Megdunarodnoj konferencii k 300-letiju Rossijskogo flota. Voenno-morskoj flot I sudostroenie v sovremennykh usloviyah (NSN-96). SPb, 1996.
4. Dogadin A.V., Isarenkov O.V., Sokolov V.F. Optiko-elektronnye izmeritelnye sistemy [Optoelectronic measuring systems]. Zarubegnyi opyt. Tehnologija sudoremonta, 1995, №2.
5. Dogadin A.V., Isarenkov O.V., Sokolov V.F. K voprosu o vypolnenii proverochnykh korpusnykh rabot. Sarubegnyi opyt [On the issue of performing verification hull works]. Zruarubezhnyy opyt. Tehnologija sudoremonta. 1996, № 1.
6. Dubinka V.V. Osobennosti razrabotki proektnoi tehnologii razmernogo kontrolja krupnogabaritnykh konstrukcij ofshornykh sooruzhenij na primere MLSP "Prirazlomnaja" [Features of the development of design technology for dimensional control of large-sized structures of offshore structures on the example of MLSP "Prirazlomnaja"]. Materialy Vtoroi megdunarodnoj konferencii po sudostroeniju ISC'98). SPb, 1998.
7. Dubinka V.V. Issledovanie v vozmognostej snigenija koefficientov zapasa prochnosti sudovykh konstrukcij za schet bysokotochnogo kontrolja geometrii koordinatnymi metodami s pomsch'ju elektronno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem [Investigation of the possibilities of reducing the safety margin coefficients of ship structures due to high-precision geometry control by coordinate methods using electron-optical measuring systems]. Materialy Vtoroi megdunarodnoj konferencii po sudostroeniju ISC'98. SPb, 1998.
8. Dubinka V.V. Sozdanie tehnologii beskontaktnogo kontrolja geometricheskikh parametrov krupnogabaritnykh konstrukcij promyshlennykh objektov s pomoshju teodolitnykh izmeritel'nykh sistem [Creation of technology for contactless control of geometric parameters of large-sized structures of industrial facilities using theodolite measuring systems]. Sbornik trudov NTO, 1997, № 1
9. Dubinka V.V., Rogosin V.A. «Admiralteiskie verfi» ispol'zujut pri postrojke tankerov akkuratnye tehnologii Admiralty Shipyards use neat technologies in the construction of tankers]. Morskaja birzha, 2002, № 1
10. Dubinka V.V. Sovremennyye tehnologii razmernogo kontrolja v sudostroyenii i sudoremonte s ispol'zovaniem elektronno-opticheskikh koordinatnykh izmeritel'nykh sistem. Morskaya birzha, 2003, № 2
11. Dubinka V.V. Proverka na stapelyakh. www.Korabel.ru / Vypusk 2 (28) / Avgust 2015

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

**Александр Владимирович Догадин**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технология судостроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: aww\_dg@mail.ru

**Alexander V. Dogadin**, Ph.D. (Eng.), assistant professor, assistant professor of the Department of ship technologie, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: aww\_dg@mail.ru

**Владимир Витальевич Дубинка**, начальник отдела технологий размерного контроля Бум Техно , 191025, Санкт-Петербург, Невский пр., 65, пом. 13-н, e-mail: vdoubynka@bumt.spb.ru

**Vladimir V. Dubinka**, Head of the Department of Dimensional Control Technologies, Limited liability company "Boom Techno". Nevsky Prospekt, 65, of. 13-n, St. Petersburg, 191025, Russian Federation, e-mail: vdoubynka@bumt.spb.ru

**Владимир Алексеевич Рогозин**, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника Инженерного центра Адмиралтейские верфи, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: rogozn@ashipyards.com

**Vladimir A. Rogozin**, Ph.D. (Eng.), assistant professor, deputy Head of the engineering Center, joint Stock company Admiralty Shipyards, Fontanka River embankment, 203, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: rogozin@ashipyards.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 25.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 24.10.2022.

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

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

Научная статья

УДК 629.12.001.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.008>

#### Методика определения жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения нетрадиционных виброизоляторов MAMSAR на основе экспериментальных статических нагрузочных характеристик

М.А. Минасян<sup>1</sup> mamsar@mail.ru, А.М. Минасян<sup>1</sup> menos405@gmail.com

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

**Аннотация.** Объектом исследования являются запатентованные канатные, пружинно-канатные и канатно-резиновые виброизоляторы MAMSAR.

Выбор материала упругого элемента виброизолятора является сложной операцией, поскольку учет его характерных свойств и особенностей необходимо сопоставить с требованиями, предъявляемыми к конкретной виброзащитной системе. По структуре стальной канат является одним из наиболее подходящих материалов, используемых в качестве упругих элементов виброизоляторов. Для улучшения упруго-демпфирующих свойств в виброизоляторах MAMSAR конструктивно объединены канат с пружиной или канат с резиной.

Целью работы является разработка методики определения основных характеристик оригинальных виброизоляторов MAMSAR на основе экспериментальных статических нагрузочных характеристик по осям X, Y, Z.

Результаты работы:

1. Канатные составляющие у пружинно-канатных виброизоляторов, помимо демпфирования, служат также поддерживающими элементами.
2. Полученные характеристики виброизоляторов MAMSAR обеспечивают возможность их применения для различных объектов техники.

**Ключевые слова:** жесткость, коэффициент демпфирования и поглощения виброизоляторов, нагрузочные характеристики виброизоляторов.

**Для цитирования:** Минасян М.А., Минасян А.М. Методика определения жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения нетрадиционных виброизоляторов MAMSAR на основе экспериментальных статических нагрузочных характеристик, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 72—79.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.008>

#### Method of determination of stiffness, damping and absorption coefficients of non-traditional MAMSAR vibration isolators based on experimental static load characteristics

Minas A. Minasyan<sup>1</sup> mamsar@mail.ru, Armen M. Minasyan<sup>1</sup> menos405@gmail.com

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

**Abstract.** The object of the study is the patented rope, spring-rope and rope-rubber vibration isolators MAMSAR.

The choice of the material of the elastic element of the vibration isolator is a complex operation, since taking into account its characteristic properties and features must be compared with the requirements for a specific vibration protection system. According to the structure, steel rope is one of the most suitable materials used as elastic elements of vibration isolators. To improve the elastic-damping properties in MAMSAR vibration isolators, a rope with a spring or a rope with rubber are structurally combined.

The aim of the work is to develop a methodology for determining the main characteristics of the original MAMSAR vibration isolators based on experimental static load characteristics along the X, Y, Z axes.

Results of the work:

1. Rope components of spring-rope vibration isolators, in addition to damping, also serve as supporting elements.
2. The obtained characteristics of MAMSAR vibration isolators provide the possibility of their application for various objects of technology.

**Key words:** stiffness, damping and absorption coefficient of vibration isolators, load characteristics of vibration isolators.

**For citation:** Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan, Method of determination of stiffness, damping and absorption coefficients of non-traditional MAMSAR vibration isolators based on experimental static load characteristics. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 72—79.

**Введение**

Обзор научно-технической, патентной литературы и других источников информации, анализ и сопоставление свойств виброизолирующих конструкций и креплений (ВИКиК), изготовленных с применением различных упругих элементов, а также сравнение их эксплуатационно-технологических качеств показали, что по структуре стальной канат является одним из наиболее подходящих материалов, используемых в качестве пожаростойкого упругого элемента [1-28].

Для решения проблем виброизоляции в любой области современной техники в работах [1-4, 8, 13-19, 25, 27, 28] обоснована актуальность применения нетрадиционных ВИКиК, в частности нетрадиционных виброизоляторов (НТВ) MAMSAR.

В рамках дальнейшего развития и усовершенствования, а также практической реализации НТВ MAMSAR [1-4], ниже представлена методика определения жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения одиннадцати опытных образцов.

Гипотеза исследования – подтверждение эффективности по основным характеристикам НТВ MAMSAR [1-4], а также демпфирующих свойств канатных элементов в пружинно-канатных виброизоляторах на основе экспериментальных исследований.

В качестве НТВ MAMSAR рассмотрены канатные, пружинно-канатные и канатно-резиновые виброизоляторы (рис. 1) [1-4].

**Цель работы** – определение жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения НТВ MAMSAR на основе экспериментальных нагрузочных характеристик и оценка их эффективности при расчете амортизации дизель-генераторного агрегата, электро-компрессора, а также других технических объектов.

**Задачи исследования:**

1. Провести статические испытания опытных образцов НТВ MAMSAR (рис. 1) [1-4];

2. По экспериментальным нагрузочным характеристикам определить жесткости, коэффициенты демпфирования и поглощения НТВ MAMSAR.

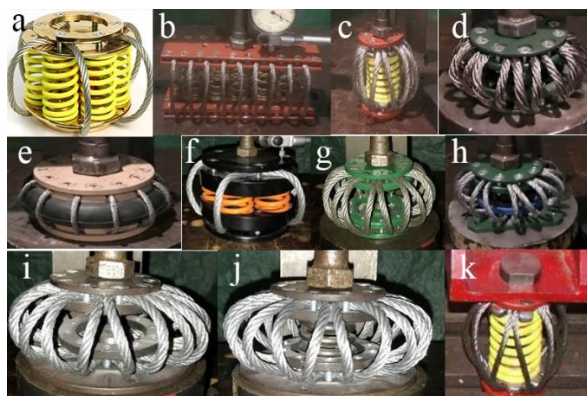


Рис. 1. Нетрадиционные виброизоляторы: a, b, c, j, k – ПКВ; d, g, h, i – ТКВ; e – ТКРВ

Объект исследования, общая теория и блок-схема определения экспериментальных статических нагрузочных характеристик, жесткостей,

коэффициентов демпфирования и поглощения НТВ представлены на рис. 1 – 3.

Упругие элементы виброизоляторов принято характеризовать кривой «сила-деформация», то есть зависимостью приложенной силы P от деформации упругого элемента z (рис. 2) [1 – 4, 24, 26, 28, 30, 75, 125, 152].

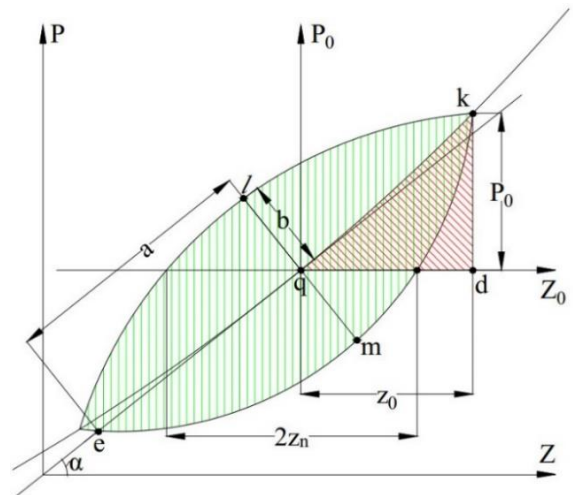


Рис. 2. Гистерезисная диаграмма виброизолирующих упругодемпфирующих элементов

Упругий элемент называют линейным, если сила упругости пропорциональна деформации. При этом коэффициент пропорциональности C, называемый статической жесткостью элемента и определяемый как тангенс угла наклона прямой «сила-деформация» к оси абсцисс, постоянен и не зависит от деформации.

Для нелинейных упругих элементов жесткость не является величиной постоянной, а изменяется вместе с деформацией. Статическая жесткость в какой-либо точке q кривой «сила-деформация» (рис. 2) определяется в этом случае как тангенс угла наклона касательной к кривой в данной точке или как производная в данной точке [2]:

$$c = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dP}{dz} = \frac{P_0}{z_0} \quad (1)$$

С практической стороны координаты точки q на кривой «сила-деформация» (рис. 2) обычно соответствуют величине статической нагрузки (весу амортизированного технического объекта), размещенной на виброизоляторах, и величине деформации (прогибу) виброизолятора в этой точке.

Если технический объект, например, дизель-генератор или поршневой электро-компрессор на опорных канатных или пружинно-канатных виброизоляторах одиночным легким ударом по корпусу заставить колебаться, то даже при малых амплитудах, не выходящих за пределы пропорциональности, в материале виброизолятора будут происходить необратимые процессы, сопровождающиеся рассеянием тепловой энергии за счет внутреннего трения. Эти потери характеризуются петлей гистерезиса, базирующейся в окрестности точки q (рис. 2), а площадь петли «elkme» – количество энергии, поглощенной и рассеянной в виде тепла материалом виброизолятора за один цикл колебания. При этом в зависимости от особенностей структуры материала

упругого элемента виброизолятора, амплитуды цикла и скорости нагружения виброизолятора (частоты) наклон большой оси «eqk» (рис. 2) гистерезисной петли может меняться, следовательно, динамическая жесткость виброизолятора может отличаться от статической.

При учете внутреннего сопротивления материала очень часто исходят из так называемой гипотезы Фойгта, согласно которой силы внутреннего сопротивления принимаются пропорциональными скорости деформации и силовая реакция виброизолятора описывается в виде

$$R = cz + h\dot{z} \quad (2)$$

где  $h$  – коэффициент внутреннего трения.

По принципу Даламбера дифференциальное уравнение вынужденных колебаний системы с одной степенью свободы при гармоническом возбуждении можно записать в виде:

$$m\ddot{z} + h\dot{z} + cz = P \cos p, \quad (3)$$

где  $m$  – масса технического объекта на виброизоляторах;

$P, p$  – соответственно амплитуда и частота возбуждающей силы.

Применение гипотезы Фойгта для описания колебаний тел на виброизоляторах, получивших наибольшее распространение в технике виброзащиты (резиновых, резинометаллических, металлических, синтетических и т.п.), приводит к результатам, не согласующимся с опытом. Большое число экспериментальных работ, проводившихся в этой области, указывает на то, что демпфирование для подавляющего большинства виброизолирующих материалов строительных и металлических конструкций почти совершенно не зависит от скорости деформации (частоты колебаний), а зависит в той или иной мере лишь от амплитуды колебаний.

Учет демпфирования в таких системах и конструкциях проводят на основе изучения гистерезисных диаграмм, полученных во время эксперимента. При этом широкое распространение и признание получил метод внутреннего поглощения энергии, предложенный Е.С. Сорокиным, который хорошо согласуется с результатами экспериментов, устраняет неоднозначность гистерезисной петли и приводит к простой и оригинальной трактовке уравнений движения.

Суть метода внутреннего поглощения энергии заключается в следующем.

Способность материала к поглощению энергии колебаний, как известно, характеризуется коэффициентом поглощения  $\Psi_0$ , представляющим отношение необратимо поглощенной работы  $\Delta W$  за цикл колебаний, измеряемой площадью петли

гистерезиса (рис. 2), ко всей упругой работе  $W$  за тот же цикл, измеряемой в том же масштабе площадью треугольника «qkd» [4]:

$$\Psi_0 = \frac{\Delta W}{W} \quad (4)$$

где  $\Delta W$  – необратимо поглощенная телом за один цикл часть энергии циклических деформаций;  $W$  – потенциальная энергия тела, отвечающая амплитуде деформаций за тот же цикл (рис. 2).

В технике, однако за коэффициент поглощения  $\Psi$  принимается значение, вчетверо больше  $\Psi_0$ , т.е.

$$\Psi = 4\Psi_0 \quad (5)$$

Как показывают опыты, гармонической нагрузке отвечает эллиптическая петля гистерезиса. Коэффициент поглощения в этом случае можно определить по формуле

$$\Psi = \frac{2\pi ab}{P_0 z_0}, \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  – полуоси эллипса (рис. 2);  $P_0$  – амплитуда внешней гармонической силы;  $z_0$  – амплитуда упругой деформации.

Учитывая, что

$$a = \frac{P_0}{\sin \alpha} \quad \text{и} \quad b = z_H \sin \alpha,$$

из (6) получаем:

$$\Psi = \frac{2\pi z_H}{z_0} = \frac{2\pi R_H}{P_0}, \quad (7)$$

где  $z_H$  – амплитуда неупругой деформации;  $R_H$  – амплитуда силы неупругого сопротивления.

В динамические расчеты коэффициент  $\Psi$  входит вместе с множителем  $1/2\pi$ , характеризующим цикличность процесса. Поэтому в теории удобнее оперировать величиной [2]

$$\gamma_M = \frac{\Psi}{2\pi} = \frac{z_H}{z_0} = \frac{R_H}{P_0}, \quad (8)$$

Данная величина называется коэффициентом неупругого сопротивления. Ее можно называть также коэффициентом демпфирования виброизолятора.

Из (8) имеем

$$R_H = \gamma_M P_0 = \gamma_M c z_0 \quad (9)$$

То есть сила неупругого сопротивления пропорциональна жесткости  $c$  и амплитуде упругой деформации  $z_0$ .

Блок-схема определения экспериментальных статических нагрузочных характеристик, жесткостей, коэффициентов демпфирования и поглощения НТВ представлена на рис. 3.

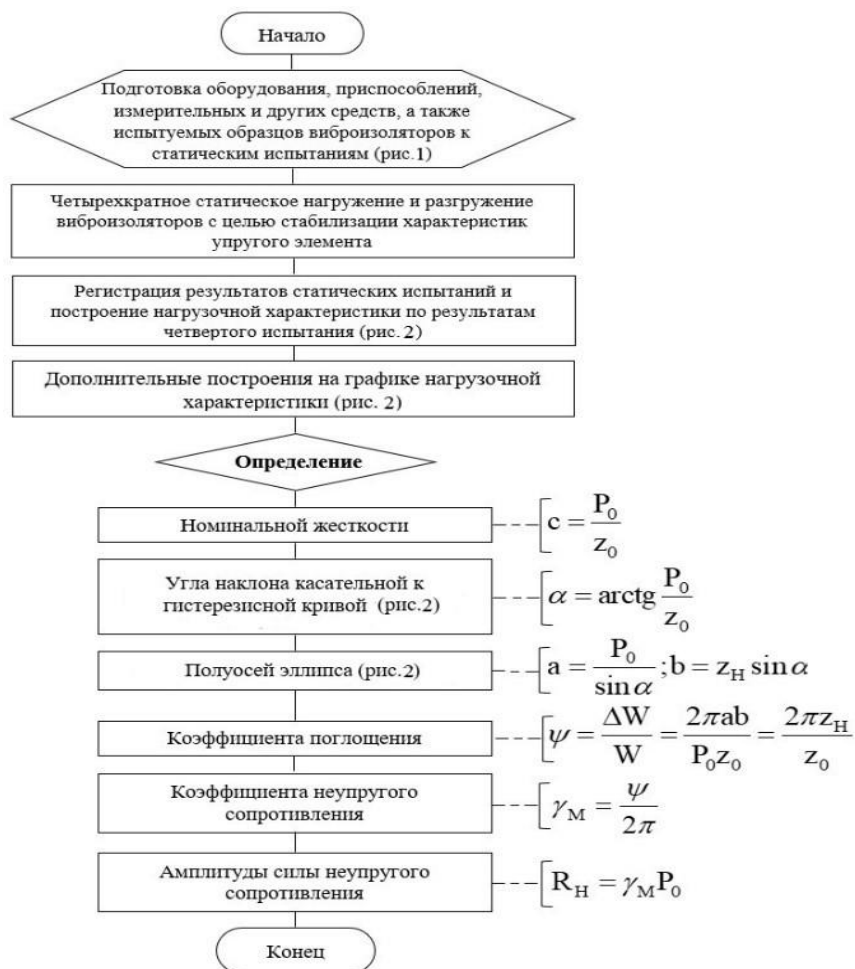


Рис. 3. Блок-схема определения экспериментальных статических нагрузочных характеристик, жесткостей, коэффициентов демпфирования и поглощения НТВ

1. Испытания на сжатие по продольной – вертикальной оси Z виброизолятора

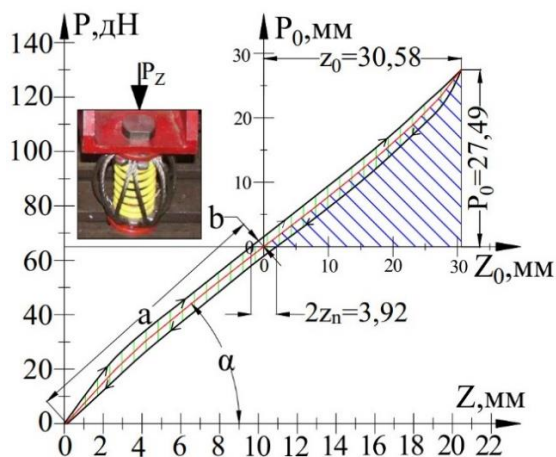


Рис. 4. Гистерезисная диаграмма ПКВ (рис. 2.1, к) по оси Z

Угол наклона касательной к кривой:  
 $\alpha = \arctg \frac{P_0}{z_0} = \arctg \frac{27,49}{30,58} = 41,95 \approx 42^\circ$

Полуоси эллипса:

$$a = \frac{P_0}{\sin \alpha} = \frac{27,49}{\sin 42} = 41,12 \text{ мм};$$

$$b = z_H \sin \alpha = \frac{3,92}{2} \times \sin 42 = 1,31 \text{ мм}$$

Коэффициент поглощения:

$$\psi = \frac{2\pi z_H}{z_0} = \frac{2\pi a b}{P_0 z_0} = \frac{2\pi \times 41,12 \times 1,31}{27,49 \times 30,58} \approx 0,40$$

Коэффициент неупругого сопротивления:

$$\gamma_M = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{0,4}{2\pi} = 0,06$$

Таблица 1  
Амплитуда силы неупругого сопротивления ПКВ (рис. 1, к) по оси Z

| Нагрузка (P <sub>0</sub> ), Н | γ <sub>М</sub> | R <sub>Н</sub> , Н | Нагрузка (P <sub>0</sub> ), Н | γ <sub>М</sub> | R <sub>Н</sub> , Н |
|-------------------------------|----------------|--------------------|-------------------------------|----------------|--------------------|
| 0                             | 0,06           | 0                  | 650                           | 0,06           | 39                 |
| 200                           | 0,06           | 12                 | 700                           | 0,06           | 42                 |
| 300                           | 0,06           | 18                 | 800                           | 0,06           | 48                 |
| 400                           | 0,06           | 24                 | 900                           | 0,06           | 54                 |
| 500                           | 0,06           | 30                 | 1000                          | 0,06           | 60                 |
| 600                           | 0,06           | 36                 | 1100                          | 0,06           | 66                 |

**2. Испытания на сдвиг по горизонтальной плоскости XY**

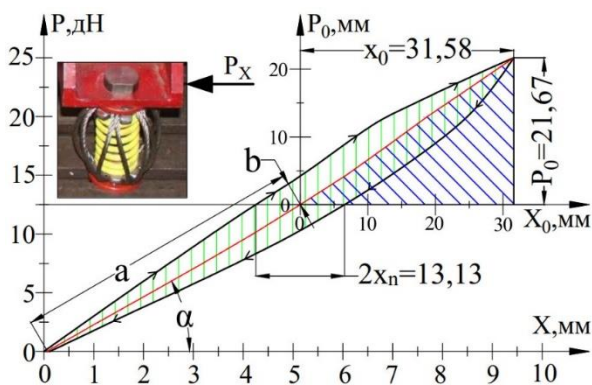


Рис. 5. Гистерезисная диаграмма ПКВ (рис. 1, к) на сдвиг

Угол наклона касательной к кривой:

$$\alpha = \arctg \frac{P_0}{x_0} = \arctg \frac{21,67}{31,58} = 34,46 \approx 35^\circ$$

Полуоси эллипса:

$$a = \frac{P_0}{\sin \alpha} = \frac{21,67}{\sin 35} = 38,30 \text{ мм};$$

$$b = x_H \sin \alpha = \frac{13,13}{2} \times \sin 35 = 3,71 \text{ мм}$$

Коэффициент поглощения:

$$\psi = \frac{2\pi x_H}{x_0} = \frac{2\pi a b}{P_0 x_0} = \frac{\pi \times 13,13}{31,58} \approx 1,31$$

Коэффициент неупругого сопротивления:

$$\gamma_M = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{1,31}{2\pi} = 0,21$$

Таблица 2

**Амплитуда силы неупругого сопротивления ПКВ (рис. 1, к) на сдвиг**

|                      |      |      |       |       |      |       |
|----------------------|------|------|-------|-------|------|-------|
| (P <sub>0</sub> ), Н | 0    | 100  | 125   | 150   | 200  | 250   |
| γ <sub>М</sub>       | 0,21 | 0,21 | 0,21  | 0,21  | 0,21 | 0,21  |
| R <sub>н</sub> , Н   | 0,00 | 21,0 | 26,25 | 31,50 | 42,0 | 52,50 |

Жесткости, коэффициенты демпфирования и поглощения нетрадиционных виброизоляторов (рис. 1, а, b, с, d, e, f, g, h, i, j, k), полученные на основе экспериментальных нагрузочных характеристик, представлены в итоговой табл. 3.

Таблица 3

**Коэффициенты демпфирования и поглощения виброизоляторов при номинальных жесткостях по осям координат Z, X и Y (рис. 1)**

| НТВ (рис. 1) | Z, X и Y | C, Н/м | КД   | КП   | НТВ (рис. 1) | Z, X и Y | C, Н/м | КД   | КП   |
|--------------|----------|--------|------|------|--------------|----------|--------|------|------|
| a            | Z        | 483728 | 0,13 | 0,80 | f            | Z        | 831137 | 0,25 | 1,56 |
|              | X и Y    | 112778 | 0,20 | 1,28 |              | X и Y    | 126187 | 0,19 | 1,17 |
| b            | Z        | 206790 | 0,12 | 0,74 | g            | Z        | 64314  | 0,31 | 1,95 |
|              | X        | 23599  | 0,25 | 1,54 |              | X и Y    | 15583  | 0,38 | 2,36 |
|              | Y        | 22706  | 0,24 | 1,49 |              | Z        | 133776 | 0,21 | 1,29 |
| c            | Z        | 221995 | 0,21 | 1,29 | h            | X и Y    | 25784  | 0,34 | 2,17 |
|              | X и Y    | 26861  | 0,32 | 2,00 |              | Z        | 115220 | 0,18 | 1,12 |
| d            | Z        | 205898 | 0,25 | 1,57 | i            | X и Y    | 27918  | 0,32 | 1,98 |
|              | X и Y    | 51969  | 0,38 | 2,36 |              | Z        | 176922 | 0,14 | 0,85 |
| e            | Z        | 854282 | 0,15 | 0,95 | j            | X и Y    | 29241  | 0,31 | 1,92 |
|              | X и Y    | 99826  | 0,22 | 1,36 |              | Z        | 66618  | 0,06 | 0,40 |
|              |          |        |      |      |              | X и Y    | 25240  | 0,21 | 1,31 |

Обобщенные вертикальные номинальные, минимальные и максимальные нагрузки, деформации, жесткости и частоты свободных колебаний виброизоляторов (рис. 1) представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Вертикальные номинальные, минимальные и максимальные нагрузки, деформации, жесткости и частоты свободных колебаний виброизоляторов (рис. 1)**

| Рис. 1 | P <sub>Znom</sub> , Н | P <sub>Zmin</sub> , Н | P <sub>Zmax</sub> , Н | S <sub>Znom</sub> , М | S <sub>Zmin</sub> , М | S <sub>Zmax</sub> , М | C <sub>Znom</sub> , Н/м | C <sub>Zmin</sub> , Н/м | C <sub>Zmax</sub> , Н/м |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|        |                       |                       |                       | f <sub>z</sub> , Гц   | f <sub>z</sub> , Гц   | f <sub>z</sub> , Гц   |                         |                         |                         |
| a      | 1000                  | 500                   | 2000                  | 0,0021                | 0,0010                | 0,0049                | 483728                  | 495049                  | 457666                  |
|        |                       |                       |                       | 11,07                 | 15,83                 | 7,61                  |                         |                         |                         |
| b      | 700                   | 200                   | 1400                  | 0,0036                | 0,0007                | 0,0095                | 206790                  | 281690                  | 147524                  |
|        |                       |                       |                       | 8,65                  | 18,89                 | 5,17                  |                         |                         |                         |
| c      | 600                   | 100                   | 1300                  | 0,0027                | 0,0003                | 0,0075                | 221995                  | 317460                  | 172872                  |
|        |                       |                       |                       | 9,68                  | 28,35                 | 5,80                  |                         |                         |                         |
| d      | 300                   | 100                   | 700                   | 0,0014                | 0,0004                | 0,0039                | 205898                  | 218579                  | 179602                  |
|        |                       |                       |                       | 13,18                 | 23,53                 | 8,06                  |                         |                         |                         |
| e      | 1000                  | 200                   | 2000                  | 0,0012                | 0,0002                | 0,0023                | 854282                  | 898876                  | 862069                  |
|        |                       |                       |                       | 14,71                 | 33,74                 | 10,45                 |                         |                         |                         |
| f      | 1000                  | 400                   | 2000                  | 0,0012                | 0,0004                | 0,0029                | 831137                  | 987654                  | 687285                  |
|        |                       |                       |                       | 14,51                 | 25,01                 | 9,33                  |                         |                         |                         |
| g      | 300                   | 100                   | 500                   | 0,0058                | 0,0009                | 0,0099                | 64314                   | 106383                  | 50251                   |
|        |                       |                       |                       | 7,37                  | 16,41                 | 5,04                  |                         |                         |                         |
| h      | 400                   | 100                   | 800                   | 0,003                 | 0,0005                | 0,0072                | 133776                  | 191387                  | 111421                  |
|        |                       |                       |                       | 9,20                  | 22,02                 | 5,94                  |                         |                         |                         |

|   |     |     |      |         |         |         |        |        |        |
|---|-----|-----|------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| i | 400 | 100 | 800  | 0,0035  | 0,0006  | 0,0092  | 115220 | 175439 | 86674  |
|   |     |     |      | 8,54    | 21,08   | 5,24    |        |        |        |
| j | 700 | 100 | 1400 | 0,0042  | 0,0004  | 0,0092  | 176922 | 277778 | 151679 |
|   |     |     |      | 8,00    | 26,52   | 5,24    |        |        |        |
| k | 700 | 200 | 1300 | 0,01104 | 0,00241 | 0,02045 | 66618  | 82987  | 63570  |
|   |     |     |      | 4,91    | 10,25   | 3,52    |        |        |        |

### Заключение

Представленная методика предназначена для определения жесткости, коэффициентов демпфирования и поглощения нетрадиционных виброизоляторов MAMSAR (рис. 1) на основе экспериментальных статических нагрузочных характеристик.

Выполненные экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Упругие элементы всех нетрадиционных виброизоляторов MAMSAR (рис. 1, а, b, с, d, e, f, g, h, i, j, k) характеризуются гистерезисными кривыми «сила-деформация», следовательно, их динамические жесткости отличаются от статических.

2. Экспериментально полученные гистерезисные кривые пружинно-канатных виброизоляторов (рис. 1, а, b, с, d, f, i, j, k) [94] подтверждают, что канатные элементы не только

поддерживают и обеспечивают их эффективность в горизонтальной плоскости, но являются и демпфирующими элементами. Эта особенность важна, поскольку пружина не обладает демпфирующим эффектом. Петли канатных элементов между опорными деталями препятствуют передаче звуковой вибрации на высоких частотах.

3. Итоговые характеристики представленных опытных образцов НТВ (табл. 3, 4) подтверждают готовность их практической реализации в качестве виброизолирующих опор систем амортизации различных технических объектов.

4. Полученные результаты экспериментальных исследований широкого спектра различных нетрадиционных виброизоляторов еще раз подтверждают актуальность работ по данному направлению.

### Литература

1. Минасян А.М. Создание и развитие средств снижения виброактивности судовых дизель-генераторных агрегатов: дис. канд. техн. наук: 05.08.05- СЭУ и их элементы (главные и вспомогательные) / СПб. 2013. 201 с.
2. Аунг Мьо Тхант. Предотвращение вибрационных повреждений судовых дизель-генераторных агрегатов, находящихся в эксплуатации, совершенствованием несущих и виброизолирующих конструкций и креплений: дис. канд. техн. наук: 05.08.05- СЭУ и их элементы (главные и вспомогательные) / СПб. 2019. 168 с.
3. Цзэн Цзюньцзе. Разработка и исследование виброизолирующей муфты дизель-генератора с канатными упругими элементами: дис. канд. техн. наук: 05.08.05- СЭУ и их элементы (главные и вспомогательные) / СПб. 2021. 146 с.
4. Киав Тхет Наинг. Разработка методик расчета и исследования эффективности упругих связей системы амортизации судового дизель-генератора: дис. канд. техн. наук: 05.08.05- СЭУ и их элементы (главные и вспомогательные) / СПб. 2022. 165 с.
5. Andrzej Flaga, Jacek Szulej, Piotr Wielgos // Comparison of determination methods of vibration's damping coefficients for complex structures «Сопоставление методов определения коэффициентов демпфирования вибрации для сложных конструкций» // Budownictwo i Architektura 3 (2008) 53-61.
6. Andrzej GRZADZIELA, Marcin KLUCZYK // The impact estimation of damping foundations in dynamics of the rotor system «Оценка влияния демпфирующих оснований на динамику роторной системы» // DIAGNOSTYKA, 2017, Vol. 18, No. 3. pp – 7.
7. Claude Prost and Joshua Partyka, The Socitec Group // Wire rope vs elastomeric isolators in naval applications «Канатные и эластомерные изоляторы для применения в военно-морском флоте» // Vibro Dynamic// pp – 10.
8. Di Qu, Xiandong Liu, Guangtong Liu, Yifan Bai and Tian He// Analysis of vibration isolation performance of parallel air spring system for precision equipment transportation «Анализ эффективности виброизоляции параллельной пневматической пружинной системы для транспортировки прецизионного оборудования» // Measurement and Control, 1–12, 2019.
9. GERB - Vibration Isolator in shipbuilding «Виброизолятор в судостроении». pp – 6.
10. GERB-Elastic support of gas and diesel generators «Упругая опора газовых и дизельных генераторов». pp -6.
11. M Jurevicius, V Vekteris, G Viselga, V Turla, A Kilikevicius and I Ilijn // Dynamic research on a low-frequency vibration isolation system of quasi-zero stiffness «Динамическое исследование системы низкочастотной виброизоляции квази - нулевой жесткости» // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 2019, Vol. 38(2) 684–691.
12. Mathias Winberg // Noise and Vibration Control of Combustion Engine Vehicles «Контроль шума и вибрации транспортных средств с двигателем внутреннего сгорания» // 2005, pp – 221.
13. Michael J. Brennan, Brian Mace and D.C. Lee// A Design Criterion for the Vibration Isolation of a Marine Diesel Generator Set «Критерий проектирования виброизоляции судовой дизель-генераторной агрегата» // Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering · April 2006. pp – 11.
14. Mr Biju George, General Manager// Installation design for low noise «Конструкция установки для обеспечения низкого уровня шума» // Mazagon Dock Shipbuilders Limited, Mumbai. pp - 13.

15. N.S. Ahirrao, Dr.S.P. Bhosle, Dr.D.V. Nehete // Dynamics and Vibration Measurements in Engines «Измерения динамики и вибрации в двигателях» // 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering, 2018.
16. Nikola P. Žegarac // Research into the causes of increased vibration levels on the diesel-electric generators set at the air traffic control BELGRADE airport «Исследование причин повышенного уровня вибрации дизель-электрических генераторов, установленных в аэропорту BELGRADE управления воздушным движением» // Serbian Academy of inventors and scientists, Belgrade, Republic of Serbia. pp – 18.
17. NUCLEAR – Mitigation of diesel generator vibrations in nuclear applications «Снижение вибраций дизель-генератора в ядерных установках» // 2018, pp – 100.
18. P.S. Balaji, M.E. Rahman, Leblouba Moussa, H. H. Lau. Wire rope isolators for vibration isolation of equipment and structures «Канатные виброизоляторы для виброизоляции оборудования и конструкций»// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 78 (2015), pp – 12.
19. Raymond Chia, Dr Ivan Tam and Dr Arun Kr. Dev // Maritime Sustainability and Maritime Labour Convention - Reducing Vibration and Noise Levels On board Ships for Health and Safety of Seafarers «Снижение уровня вибрации и шума на борту судов в интересах здоровья и безопасности моряков» // Newcastle University ePrints. 2017, pp – 25.
20. S. Daley, J. Hätönen & D. H. Owens // Department of Automatic Control & Systems Engineering, University of Sheffield, Sheffield, S1 3JD, UK // Active vibration isolation in a “smart spring” mount using a repetitive control approach «Активная виброизоляция в креплении “умная пружина” с использованием повторяющегося подхода к управлению» // 2005, p - 6.
21. Svetlana Polukoshko// Estimation of damping capacity of rubber vibration isolators under harmonic excitation «Оценка демпфирующей способности резиновых виброизоляторов при гармоническом возбуждении» // Ventspils University College, Engineering Research Institute “VSRС”, Ventspils, Latvia. 2016, pp -7.
22. Tiejun Yang, Lei Wu, Xinhui Li, Minggang Zhu, Michael J. Brennan and Zhigang Liu// Active Vibration Isolation of a Diesel Generator in a Small Marine Vessel: An Experimental Study «Активная виброизоляция дизель-генератора на малом морском судне»: An Experimental Study // 26 April 2020, pp – 10.
23. Theory of vibration / shock isolators «Теория виброизоляторов / амортизаторов. pp – 20.
24. V Clarence W. de Silva // Vibration and Shock Handbook (Mechanical Engineering) «Справочник по вибрации и ударам (Машиностроение)». 2005, pp -1771.
25. V.S. CHAVAN, R.ASKHEDKAR, S.B.SANAP // Analysis Of Anti Vibration Mounts For Vibration Isolation In Diesel Engine Generator Set «Анализ анти - вибрационных креплений для виброизоляции в дизель - генераторной установке» // V.S.Chavan, R.Askhedkar, S.B.Sanap/ International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) //Vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013, pp.1423-1428// ISSN: 2248-9622.
26. William Bloxson, Ph.D., P.E. Controlling generator set vibration to minimize «Контроль вибрации генераторной установки для минимизации» // Mechanical Engineer, MTU Onsite Energy, Mankato, Minnesota. pp – 5.
27. Xiongfeng, Liyan, Wangyingchun //Review on vibration isolation technology «Обзор технологии виброизоляции»// Journal of Physics: Conference Series. 2021, pp – 6.
28. Yuanyuan Fang, Yanyan Zuo and Zhaowang Xia //Vibration transmission analysis of nonlinear floating raft isolation system with magneto-rheological damper «Анализ передачи вибрации нелинейной системы изоляции плавучего плоты с магнитореологическим демпфером» //Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2018, Vol. 37(4) 700–710.

#### Reference

1. Minasyan A.M. Sozdanie i razvitie sredstv snizheniya vibroaktivnosti sudovykh dizel'-generatornykh agregatov: [Establishment and development of means of reducing vibration activity of marine diesel generator sets]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.08.05- SEU i ikh elementy (glavnye i vspomogatel'nye) / SPb. 2013. 201 s.
2. Aung Myo Thant. Predotvrashchenie vibratsionnykh povrezhdeniy sudovykh dizel'-generatornykh agregatov, nakhodyashchikhsya v ekspluatatsii, sovershenstvovaniem nesushchikh i vibroizoliruyushchikh konstruktsiy i krepleniy [Prevention of vibration damage to marine diesel generator sets in operation by improving load-bearing and vibration-insulating structures and fasteners]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.08.05- SEU i ikh elementy (glavnye i vspomogatel'nye) / SPb. 2019. 168 s.
3. Zeng Junjie. Razrabotka i issledovanie vibroizoliruyushchey mufty dizel'-generatorsa s kanatnymi uprugimi elementami [Development and research of a vibration-isolating coupling of a diesel generator with rope elastic elements]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.08.05- SEU i ikh elementy (glavnye i vspomogatel'nye) / SPb. 2021. 146 s.
4. Kyaw Thet Naing. Razrabotka metodik rascheta i issledovaniya effektivnosti uprugikh svyazey sistemy amortizatsii sudovogo dizel'-generatorsa [Development of methods for calculating and researching the effectiveness of elastic links of the depreciation system of a ship diesel generator]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.08.05- SEU i ikh elementy (glavnye i vspomogatel'nye) / SPb. 2022. 165 s.
5. Andrzej Flaga, Jacek Szulej, Piotr Wielgos. Comparison of determination methods of vibration’s damping coefficients for complex structures. Budownictwo i Architektura 3 (2008) 53-61.
6. Andrzej Grzadzela, Marcin Kluczyk. The impact estimation of damping foundations in dynamics of the rotor system. DIAGNOSTYKA, 2017, Vol. 18, No. 3. pp – 7.
7. Claude Prost and Joshua Partyka, The Socitec Group. Wire rope vs elastomeric isolators in naval applications. Vibro Dynamic. pp – 10.
8. Di Qu, Xiandong Liu, Guangtong Liu, Yifan Bai and Tian He. Analysis of vibration isolation performance of parallel air spring system for precision equipment transportation. Measurement and Control,1–12, 2019.
9. GERB – Vibration Isolator in shipbuilding. pp – 6.

10. GERB – Elastic support of gas and diesel generators. pp – 6.
11. M. Jurevicius, V. Vekteris, G. Viselga, V. Turla, A. Kilikevicius and I. Iljin // Dynamic research on a low-frequency vibration isolation system of quasi-zero stiffness // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 2019, Vol. 38(2) 684–691.
12. Mathias Winberg. Noise and Vibration Control of Combustion Engine Vehicles. 2005, pp – 221.
13. Michael J. Brennan, Brian Mace and D.C. Lee. A Design Criterion for the Vibration Isolation of a Marine Diesel Generator Set. Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. April 2006. pp – 11.
14. Mr Biju George, General Manager. Installation design for low noise. Mazagon Dock Shipbuilders Limited, Mumbai. pp – 13.
15. N.S. Ahirrao, Dr.S.P.Bhosle, Dr.D.V.Nehete. Dynamics and Vibration Measurements in Engines. 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering, 2018.
16. Nikola P. Žegarac. Research into the causes of increased vibration levels on the diesel-electric generators set at the air traffic control BELGRADE airport. Serbian Academy of inventors and scientists, Belgrade, Republic of Serbia. pp – 18.
17. NUCLEAR – Mitigation of diesel generator vibrations in nuclear applications. 2018, pp – 100.
18. P.S. Balaji, M.E. Rahman, Leblouba Moussa, H. H. Lau. Wire rope isolators for vibration isolation of equipment and structures. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 78 (2015), pp – 12.
19. Raymond Chia, Dr Ivan Tam and Dr Arun Kr. Dev. Maritime Sustainability and Maritime Labour Convention – Reducing Vibration and Noise Levels On board Ships for Health and Safety of Seafarers. Newcastle University ePrints. 2017, pp – 25.
20. S. Daley, J. Hätönen & D. H. Owens. Department of Automatic Control & Systems Engineering, University of Sheffield, Sheffield, S1 3JD, UK // Active vibration isolation in a “smart spring” mount using a repetitive control approach. 2005, p - 6.
21. Svetlana Polukoshko. Estimation of damping capacity of rubber vibration isolators under harmonic excitation. Ventspils University College, Engineering Research Institute “VSRIC”, Ventspils, Latvia. 2016, pp – 7.
22. Tiejun Yang, Lei Wu, Xinhui Li, Minggang Zhu, Michael J. Brennan and Zhigang Liu. Active Vibration Isolation of a Diesel Generator in a Small Marine Vessel: An Experimental Study. 26 April 2020, pp – 10.
23. Theory of vibration shock isolators. pp – 20.
24. V Clarence W. de Silva. Vibration and Shock Handbook (Mechanical Engineering). 2005, pp -1771.
25. V.S. CHAVAN, R.ASKHEDKAR, S.B.SANAP. Analysis Of Anti Vibration Mounts For Vibration Isolation In Diesel Engine Generator Set. V.S. Chavan, R.Askhedkar, S.B.Sanap. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). Vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013, pp.1423-1428. ISSN: 2248-9622.
26. William Bloxson, Ph.D., P.E. Controlling generator set vibration to minimize. Mechanical Engineer, MTU Onsite Energy, Mankato, Minnesota. pp – 5.
27. Xiongfeng, Liyan, Wangyingchun. Review on vibration isolation technology. Journal of Physics: Conference Series. 2021, pp – 6.
28. Yuanyuan Fang, Yanyan Zuo and Zhaowang Xia. Vibration transmission analysis of nonlinear floating raft isolation system with magneto-rheological damper // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2018, Vol. 37(4) 700–710.

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

**Минас Арменакович Минасян**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: mamsar@mail.ru

**Армен Минасович Минасян**, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 198262, Санкт-Петербург, пр. Ленинский, 101, e-mail: menos405@gmail.com

**Minas A. Minasyan**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: mamsar@mail.ru

**Armen M. Minasyan**, PhD (Eng), assistant professor of the Department of Computing Facilities and Information Technology, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: menos405@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.09.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.09.2022.

Научная статья  
УДК 629.12.001.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.009>

## Методика расчета амортизации судового дизель-генераторного агрегата с учетом влияния упорных бортовых, носовых и кормовых виброизоляторов

М.А. Минасян<sup>1</sup> mamsar@mail.ru, А.М. Минасян<sup>1</sup> menos405@gmail.com  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** Статья является обобщением ранее выполненных работ mamsar и рассматривает методику расчета амортизации судовой электростанции на примере СДГА-500 с неуравновешенным приводным дизелем 5ЧН 25/30 с учетом влияния упорных бортовых, носовых и кормовых виброизоляторов.

Расчеты амортизации СДГА усложняются, если приводной дизель неуравновешенный, а упорные виброизоляторы относительно несущей рамы установлены без зазоров.

Целью представленной методики является исследование влияния упорных виброизоляторов на эффективность виброизоляции общей системы амортизации и обоснование необходимости расчета амортизации СДГА с учетом влияния упорных виброизоляторов.

Методика расчета амортизации предусматривает порядок представления: схем опорной и упорной систем амортизации с соответствующими компонентами; исходных данных; последовательности расчетов амортизации по двум вариантам – без учета и с учетом влияния упорных виброизоляторов и построения частотных диаграмм.

Частоты свободных колебаний без учета влияния упорных виброизоляторов на 30–54% меньше значений, соответствующих частотам с учетом влияния упорных виброизоляторов, что свидетельствует о целесообразности расчета амортизации агрегата с учетом влияния упорных виброизоляторов.

**Ключевые слова:** опорная амортизация, упорная амортизация, расчет амортизации судового дизель-генераторного агрегата.

**Для цитирования:** Минасян М.А., Минасян А.М. Методика расчета амортизации судового дизель-генераторного агрегата с учетом влияния упорных бортовых, носовых и кормовых виброизоляторов. 2022. № 4 часть 2, С. 80—86.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.009>

## Method for calculating the vibration isolation of a marine diesel generator set, taking into consideration the influence of thrust onboard, bow and stern vibration isolators

Minas A. Minasyan<sup>1</sup> mamsar@mail.ru, Armen M. Minasyan<sup>1</sup> menos405@gmail.com  
<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** The article is a generalization of MAMSAR's previously performed work and examines the methodology for calculating the vibration isolation of a ship's power plant using the example of SDGA-500 with an unbalanced 5CHN 25/30 drive diesel engine, taking into account the influence of thrust on-board, bow and stern vibration isolators.

Calculations of SDGA vibration isolation become more complicated if the drive diesel is unbalanced, and the thrust vibration isolators relative to the load-bearing frame are installed without gaps.

The purpose of the presented methodology is to study the effect of persistent vibration isolators on the effectiveness of vibration isolation of the general suspension system and substantiate the need to calculate the depreciation of the SDGA taking into account the influence of persistent vibration isolators.

The vibration isolation calculation methodology provides for the presentation of: schemes of the support and thrust suspension systems with the corresponding components; initial data; the sequence of vibration isolation calculations according to two options – without and taking into account the influence of thrust vibration isolators and the construction of frequency diagrams.

The frequencies of free vibrations, without taking into account the influence of persistent vibration isolators, are 30–54% less than the values of the corresponding frequencies, taking into account the influence of persistent vibration isolators, which indicates the expediency of calculating the vibration isolation of the unit, taking into account the influence of persistent vibration isolators.

**Key words:** support vibration isolators, thrust vibration isolators, calculation the vibration isolation of marine diesel generator set.

**For citation:** Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan, Method for calculating the vibration isolation of a marine diesel generator set, taking into consideration the influence of thrust onboard, bow and stern vibration isolators. 2022. № 4 part 2. P. 80—86.

## Введение

Среди всех методов и средств борьбы с вибрацией судовых главных двигателей, дизель-генераторов, виброактивного оборудования и вспомогательных механизмов на первом месте по эффективности находятся средства виброизоляции.

Поэтому, представленная методика и программа расчета амортизации судовой электростанции на примере СДГА-500 с неуравновешенным приводным дизелем 5ЧН 25/30 с учетом влияния упорных бортовых, носовых и кормовых виброизоляторов является актуальной в рамках решения проблем, связанных с виброизоляцией технических объектов.

Расчеты амортизации судовых дизель-генераторных агрегатов усложняются, если приводной двигатель неуравновешенный, а упорные бортовые, носовые и кормовые виброизоляторы относительно несущей рамы установлены без зазоров и работают вместе с опорными виброизоляторами.

Представленная ниже методика является обобщением ранее выполненных работ [1–4]. Поэтому весьма целесообразным объектом теоретических исследований выбран судовой дизель-генераторный агрегат ДГА-500 с неуравновешенным дизелем 5ЧН 25/30 [1, 2, 5].

Несмотря на то, что в системе амортизации агрегата ДГА-500 упорные виброизоляторы работают с опорными виброизоляторами, при расчете амортизации влияние первых не учитывается [1-5].

### 1. Цель и задачи методики

Целью методики является теоретическое исследование влияния упорных виброизоляторов на эффективность системы амортизации.

Для достижения указанной цели необходимо решение следующих задач:

1. Представление схем опорной и упорной систем амортизации и их компонентов (рис. 1–4);
2. Подготовка исходных данных;
3. Расчет амортизации агрегата без учета и с учетом влияния упорных виброизоляторов;
4. Построение частотных диаграмм.

### 2. Особенности системы амортизации объекта исследования.

В работах [1, 3–5] при анализе причин повышенной вибрации судовых дизель-генераторных агрегатов ДГА-500 с приводными дизелями 5ЧН 25/30 на рефрижераторных судах выявлено, что упорные виброизоляторы были установлены без зазора [1, 2] и работали вместе с опорными виброизоляторами [2].

### 3. Исходные данные для расчета амортизации дизель-генераторного агрегата ДГА-500 без учета и с учетом влияния упорных виброизоляторов

Блок-схемы подготовки исходных данных и расчета амортизации СДГА представлены на рис. 5, 6.

Схема 6 частот свободных колебаний в элементах СДЭУ и частотные диаграммы результатов расчета амортизации без учета и с учетом влияния упорных виброизоляторов представлены на рис. 7.

Итоговые значения основных величин по двум вариантам расчета амортизации агрегата представлены в таблице 1.

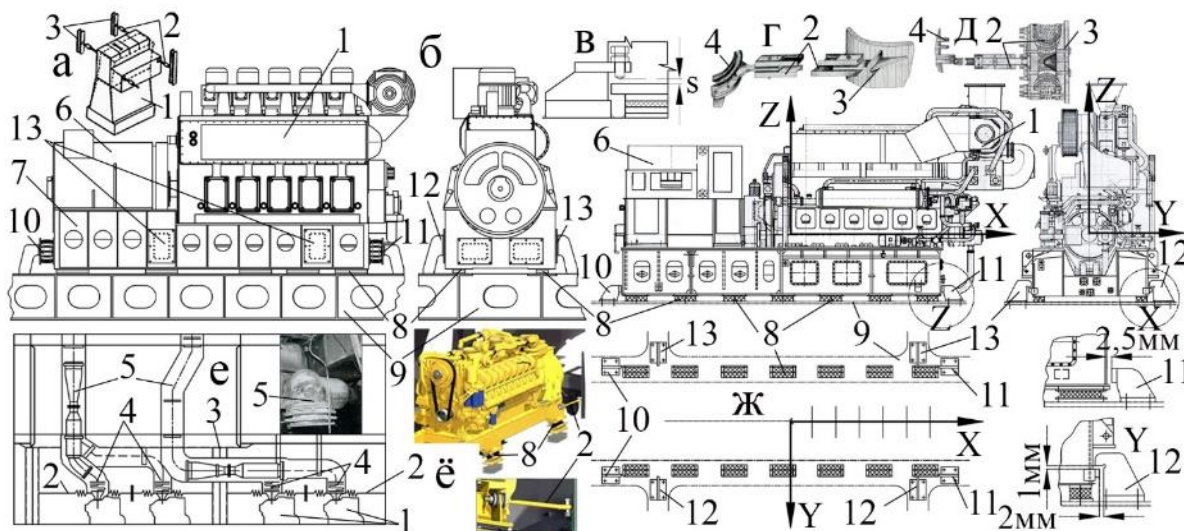


Рис. 1. Основные компоненты системы амортизации ДЭУ:

1 – дизель; 2, 3 – успокоители поперечных колебаний; 4 – упругие вставки; 5 – трубопроводы; 6 – генератор; 7 – несущая рама; 8, 10 – 13 – опорные и упорные виброизоляторы; 9 – фундаментная рама

Важно также отметить, что подбор опорных виброизоляторов и расчет амортизации проводятся, как правило, без учета влияния упорных виброизоляторов (рис. - 1.3, 1.8, 1.9, 3.1-3.3) [3].

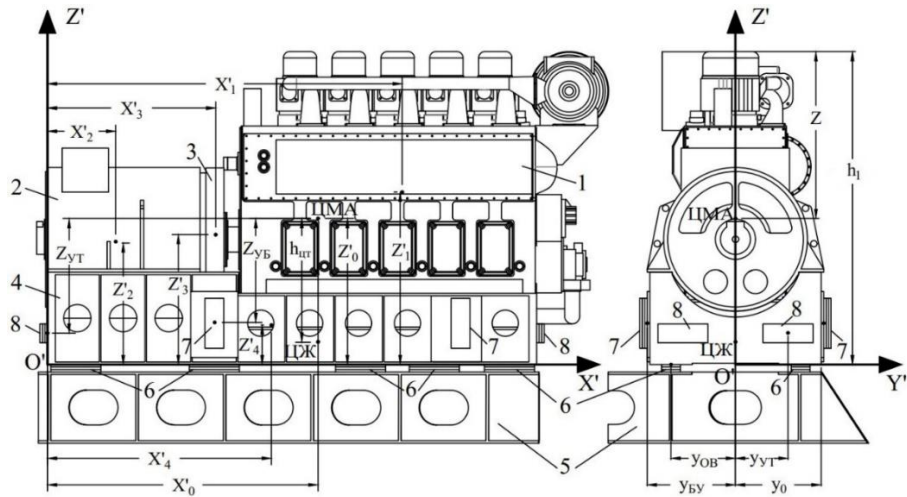


Рис. 2. Расположение центра тяжести: 1 – двигатель; 2 – генератор; 3 – маховик; 4 – несущая рама; 5 – судовой фундамент; 6, 7 и 8 – опорные, упорные бортовые и торцевые виброизоляторы

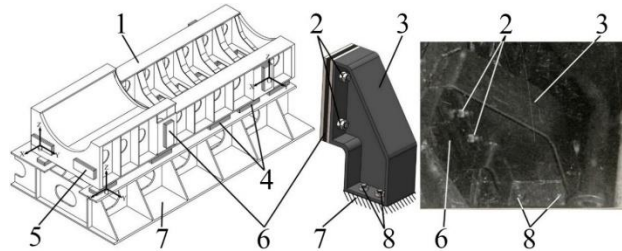


Рис. 3. Система опорной и упорной амортизации СДГА-500 с неуравновешенным приводным двигателем 5ЧН 25/30 фирмы «Зульцер»:

1 – подмоторная рама; 2 – прижимное средство; 3 – кронштейн; 4, 5, 6 – двухпластинчатые резинометаллические опорные и упорные виброизоляторы; 7 – судовой фундамент; 8 – элементы крепления кронштейна к судовому фундаменту

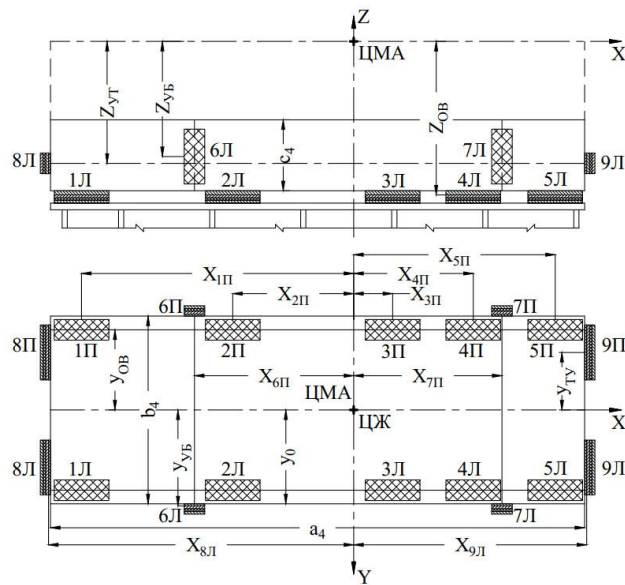


Рис. 4. Схема расположения опорных и упорных виброизоляторов ДГА-500: 1Л, 2Л, 3Л, 4Л, 5Л, 1П, 2П, 3П, 4П, 5П – опорные виброизоляторы левого и правого бортов; 6Л, 7Л, 6П, 7П – бортовые амортизирующие ограничители (упоры) по левому и правому бортам; 8Л, 9Л, 8П, 9П – торцевые амортизирующие ограничители (упоры) по левому и правому бортам

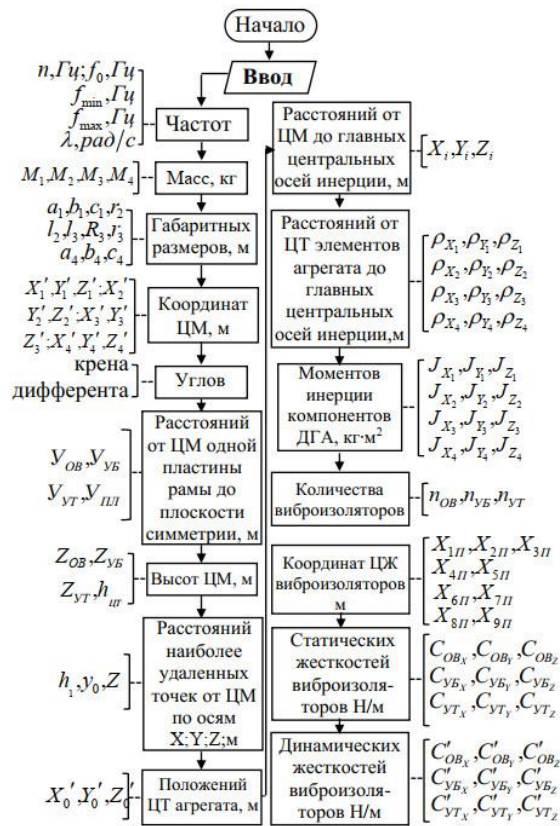


Рис. 5. Блок-схема подготовки исходных данных для расчета амортизации СДГА

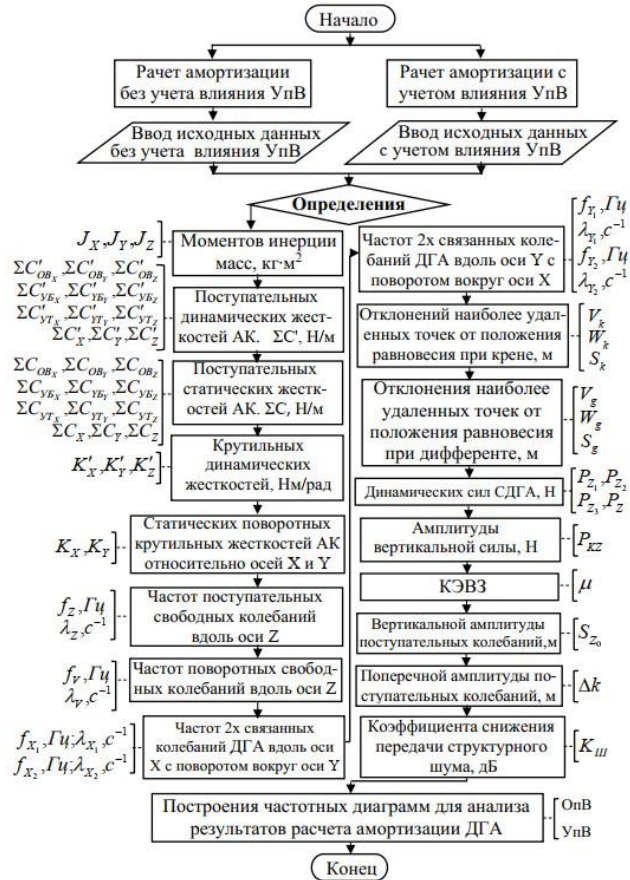


Рис. 6. Блок-схема расчета амортизации СДГА

Таблица 1

Значения основных величин по двум вариантам расчета амортизации агрегата

| Величина   | Обозначение | -УВ   | +УВ   |
|--|-------------|-------|-------|
| Частота поступательных свободных колебаний вдоль оси Z, Гц   | $f_z$       | 25    | 65    |
| Частота поворотных свободных колебаний вдоль оси Z, Гц   | $f_v$       | 64    | 302   |
| Частота двухсвязанных колебаний агрегата, поступательных вдоль оси X вместе с поворотными вокруг оси Y, Гц | $f_{x1}$    | 126   | 282   |
|  | $f_{x2}$    | 49    | 90    |
| Частота двухсвязанных колебаний агрегата, поступательных вдоль оси Y вместе с поворотными вокруг оси X, Гц | $f_{y1}$    | 53    | 114   |
|  | $f_{y2}$    | 10    | 28    |
| Отклонение наиболее удаленной точки от положения равновесия при крене, мм                                  | $S_k$       | 0,59  | 0,32  |
| Отклонение наиболее удаленной точки от положения равновесия при дифференте, мм                             | $S_g$       | 0,29  | 0,16  |
| Вертикальная амплитуда поступательных колебаний по оси Z, мм   | $S_{z0}$    | 8,3   | 0,94  |
| Поперечная амплитуда поступательных колебаний, мм  | $\Delta k$  | 4,4   | 2,11  |
| Коэффициент эффективности вибрационной защиты  | $\mu$       | 0,744 | 0,962 |

Примечание: -УВ – без учета упорных виброизоляторов; +УВ – с учетом упорных виброизоляторов.

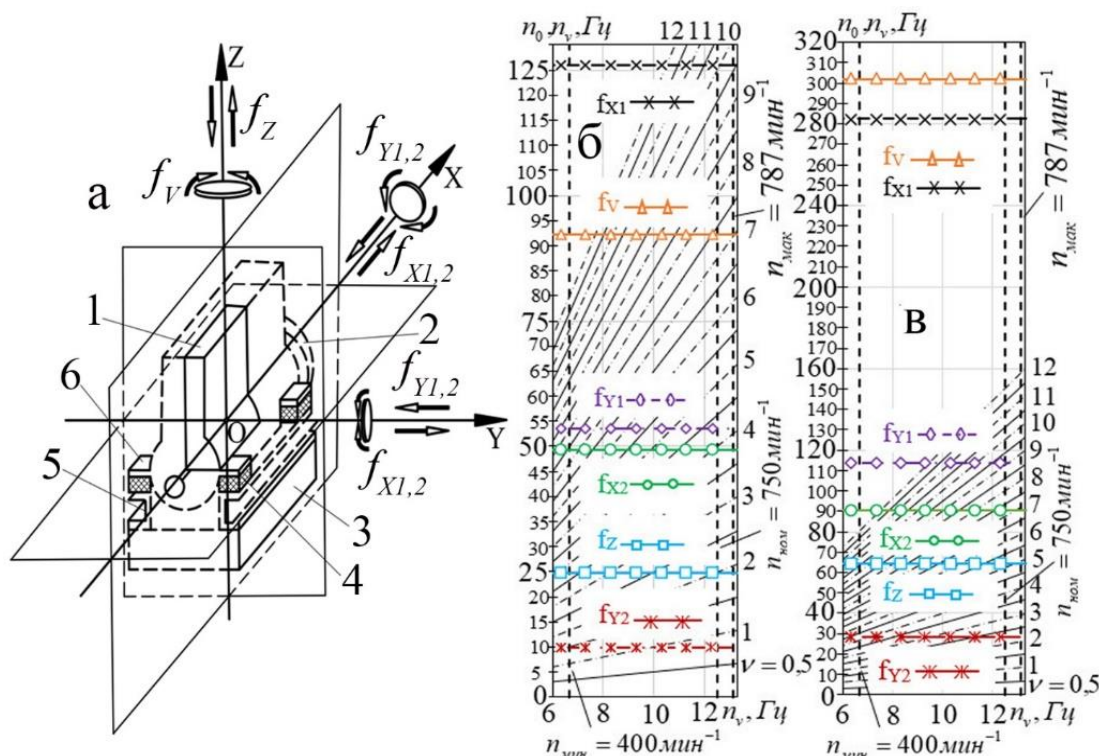


Рис. 7. Схема б частот свободных колебаний в элементах СДЭУ (а) и частотные диаграммы результатов расчета амортизации без учета (б) и с учетом (в) влияния неупорных виброизоляторов: 1 – двигатель; 2 – маховик; 3 – фундамент; 4 – виброизолятор; 5 – подмоторная рама; 6 – лапа

**Выводы**

Из результатов теоретических исследований на базе частотных диаграмм (рис. 7) и основных величин (табл. 1) следует:

1. Значения шести частот свободных колебаний без учета влияния упорных виброизоляторов на 30–54% меньше значений

соответствующих частот с учетом влияния упорных виброизоляторов. Этот факт свидетельствует о целесообразности расчета амортизации агрегата с учетом влияния упорных виброизоляторов.

2. Значения величин вертикальной и поперечной амплитуд поступательных и поперечных колебаний с учетом упоров меньше значений соответствующих величин без учета упоров.

3. При расчете амортизации без учета упоров в области номинальных частот вращения наблюдаются 7 резонансов на гармониках  $\nu=2\Gamma\text{ц}$ ,  $\nu=4\Gamma\text{ц}$ ,  $\nu=7,5\Gamma\text{ц}$ ,  $\nu=10$  и  $10,5\Gamma\text{ц}$ , а с учетом упоров – 5 резонансов на гармониках  $\nu=2,5\Gamma\text{ц}$ ,  $\nu=6\Gamma\text{ц}$ ,  $\nu=8\Gamma\text{ц}$ ,  $\nu=9$  и  $9,5\Gamma\text{ц}$ .
4. Известная система амортизации судового ДГА-500 требует существенной модернизации и усовершенствования

#### Литература

1. Аунг Мью Тхант. Предотвращение вибрационных повреждений судовых дизель-генераторных агрегатов, находящихся в эксплуатации, совершенствованием несущих и виброизолирующих конструкций и креплений: дис. канд. техн. наук: 05.08.05 – СЭУ и их элементы (главные и вспомогательные). СПб, 2019, 168 с.
2. Киав Тхет Наинг. Разработка методик расчета и исследования эффективности упругих связей системы амортизации судового дизель-генератора: дис. канд. техн. наук: 05.08.05 – СЭУ и их элементы (главные и вспомогательные). СПб, 2022, 165 с.
3. Минасян А.М. Создание и развитие средств снижения виброактивности судовых дизель-генераторных агрегатов: дис. канд. техн. наук: 05.08.05 – СЭУ и их элементы (главные и вспомогательные). СПб, 2013, 201 с.
4. Минасян М.А., Минасян А.М. Амортизация судовых дизельных энергетических установок. СПб, изд. СПбГМТУ, 2017, 360 с.
5. Беляковский Н.Г. Конструктивная амортизация механизмов, приборов и аппаратуры на судах. Л., изд. «Судостроение», 1965, 523с.
6. Michael J. Brennan, Brian Mace and D.C. Lee//A Design Criterion for the Vibration Isolation of a Marine Diesel Generator Set «Критерий проектирования виброизоляции судовой дизель-генераторной агрегата » // Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. April 2006. pp – 11.
7. Raymond Chia, Dr Ivan Tam and Dr Arun Kr. Dev // Maritime Sustainability and Maritime Labour Convention - Reducing Vibration and Noise Levels On board Ships for Health and Safety of Seafarers «Снижение уровня вибрации и шума на борту судов в интересах здоровья и безопасности моряков» // Newcastle University ePrints. 2017, pp – 25.
8. Chavan V.S., Askedkar R., Sanap S.B // Analysis Of Anti Vibration Mounts For Vibration Isolation In Diesel Engine Generator Set «Анализ анти - вибрационных креплений для виброизоляции в дизель - генераторной установке» // V.S.Chavan, R.Askhedkar, S.B.Sanap/ International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) //Vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013, pp.1423-1428// ISSN: 2248-9622.
9. William Bloxsom, Ph.D., P.E.// Controlling generator set vibration to minimize «Контроль вибрации генераторной установки для минимизации» // Mechanical Engineer, MTU Onsite Energy, Mankato, Minnesota. pp – 5.
10. Xiongfeng, Liyan, Wangyingchun //Review on vibration isolation technology «Обзор технологии виброизоляции» // Journal of Physics: Conference Series. 2021, pp – 6.

#### Reference

1. Aung Myo Thant. Predotvrashchenie vibratsionnykh povrezhdeniy sudovykh dizel'-generatornykh agregatov, nakhodyashchikhsya v ekspluatatsii, sovershenstvovaniem nesushchikh i vibroizoliruyushchikh konstruksiy i krepleniy [Prevention of vibration damage to marine diesel generator sets in operation by improving load-bearing and vibration-insulating structures and fasteners]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.08.05- SEU i ikh elementy (glavnye i vspomogatel'nye). SPb, 2019, 168 s.
2. Kyaw Thet Naing. Razrabotka metodik rascheta i issledovaniya effektivnosti uprugikh svyazey sistemy amortizatsii sudovogo dizel'-generatora [Development of methods for calculating and researching the effectiveness of elastic links of the depreciation system of a ship diesel generator]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.08.05- SEU i ikh elementy (glavnye i vspomogatel'nye). SPb, 2022, 165 s.
3. Minasyan A.M. Sozdanie i razvitie sredstv snizheniya vibroaktivnosti sudovykh dizel'-generatornykh agregatov: [Establishment and development of means of reducing vibration activity of marine diesel generator sets]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.08.05- SEU i ikh elementy (glavnye i vspomogatel'nye). SPb, 2013, 201 s.
4. Minasyan M.A., Minasyan A.M. Amortizatsiya sudovykh dizel'nykh energeticheskikh ustanovok [Depreciation of marine diesel power plants]. SPb., SPbGMTU, 2017, 360 s.
5. Belyakovskiy N.G. Konstruktivnaya amortizatsiya mekhanizmov, priborov i apparatury na sudakh [Structural depreciation of mechanisms, instruments and equipment on ships]. L., izd. «Shipbuilding», 1965, 523 s.
6. Michael J. Brennan, Brian Mace and D.C. Lee. A Design Criterion for the Vibration Isolation of a Marine Diesel Generator Set. Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, April 2006, s 11.
7. Raymond Chia, Dr Ivan Tam and Dr Arun Kr. Dev. Maritime Sustainability and Maritime Labour Convention - Reducing Vibration and Noise Levels On board Ships for Health and Safety of Seafarers. Newcastle University ePrints. 2017, s 25.
8. Chavan V.S., Askedkar R., Sanap S.B. Analysis Of Anti Vibration Mounts For Vibration Isolation In Diesel Engine Generator Set. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). Vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013, ss.1423-1428, ISSN: 2248-9622.
9. William Bloxsom, Ph.D., P.E. Controlling generator set vibration to minimize. Mechanical Engineer, MTU Onsite Energy, Mankato, Minnesota. s. 5.
10. Xiongfeng, Liyan, Wangyingchun. Review on vibration isolation technology. Journal of Physics: Conference Series. 2021, s. 6.

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

**Минас Арменакович Минасян**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: mamsar@mail.ru

**Армен Минасович Минасян**, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 198262, Санкт-Петербург, пр. Ленинский, 101, e-mail: menos405@gmail.com

**Minas A. Minasyan**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: mamsar@mail.ru

**Armen M. Minasyan**, PhD (Eng), assistant professor of the Department of Computing Facilities and Information Technology, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: menos405@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 07.11.2022.

Научная статья

УДК 621.039.534...25

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.010>

## Численное моделирование гидродинамических процессов в тракте теплоносителя забортного теплообменного аппарата

А.М. Белов<sup>1</sup> [belov\\_alj@mail.ru](mailto:belov_alj@mail.ru), С.С. Гоняева<sup>1</sup> [sofja.gonyaeva@yandex.ru](mailto:sofja.gonyaeva@yandex.ru),  
В.В. Кожемякин<sup>1</sup> [kogh2022@mail.ru](mailto:kogh2022@mail.ru), Н.А. Морозов<sup>1</sup> [nikita.morozov99@mail.ru](mailto:nikita.morozov99@mail.ru)

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

**Аннотация.** В статье представлены результаты моделирования гидродинамических процессов в забортном теплообменном аппарате по тракту теплоносителя. Теплообменный аппарат представляет собой несколько пучков параллельных труб, связанных коллекторами, которые обеспечивают передачу теплоносителя от одних рядов трубок к другим. Решение задачи осуществляется путем моделирования методом конечных элементов моделью турбулентности k- $\omega$  SST в программном комплексе Ansys. Приводится мозаичная сетка, состоящая из высококачественных полиэдрических и гексаэдрических элементов в основном объеме, построенная по методике Poly-Hexcore. Отмечено, что перед входным коллектором целесообразно установить диффузор. Он существенно снижает неравномерность раздачи среды по трубкам во входном коллекторе. Начиная со второго коллектора, раздача теплоносителя по трубкам выравнивается. Установлено, что расход в трубках нижнего ряда на 13-15% меньше чем в трубках верхнего ряда.

**Ключевые слова:** забортный теплообменный аппарат, моделирование, коллектор, гидравлическое сопротивление.

**Для цитирования:** Белов А.М., Гоняева С.С., Кожемякин В.В., Морозов Н.А. Численное моделирование гидродинамических процессов в забортном теплообменном аппарате, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 87—91.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.010>

## Numerical simulation of hydrodynamic processes in the coolant path of an outboard heat exchanger

Aleksei M. Belov<sup>1</sup> [belov\\_alj@mail.ru](mailto:belov_alj@mail.ru), Sofya S. Gonyaeva<sup>1</sup> [sofja.gonyaeva@yandex.ru](mailto:sofja.gonyaeva@yandex.ru),  
Vyacheslav V. Kozhemyakin<sup>1</sup> [kogh2022@yandex.ru](mailto:kogh2022@yandex.ru), Nikita A. Morozov<sup>1</sup> [nikita.morozov99@mail.ru](mailto:nikita.morozov99@mail.ru)

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

**Abstract.** The article presents the results of modeling hydrodynamic processes in the outboard heat exchanger along the coolant path. The heat exchanger consists of several bundles of parallel pipes connected by collectors, which provide the transfer of the coolant from one row of tubes to another. The solution of the problem is carried out by modeling by the finite element method the k- $\omega$  SST turbulence model in the Ansys software package. A mosaic mesh is presented, consisting of high-quality polyhedral and hexahedral elements in the main volume, built using the Poly-Hexcore method. It is noted that it is advisable to install a diffuser in front of the inlet manifold. It significantly reduces the uneven distribution of the medium through the tubes in the inlet manifold. Starting from the second collector, the distribution of the coolant through the tubes is leveled. It was found that the flow rate in the tubes of the lower row is 13-15% less than in the tubes of the upper row.

**Key words:** outboard heat exchanger, simulation, collector, hydraulic resistance.

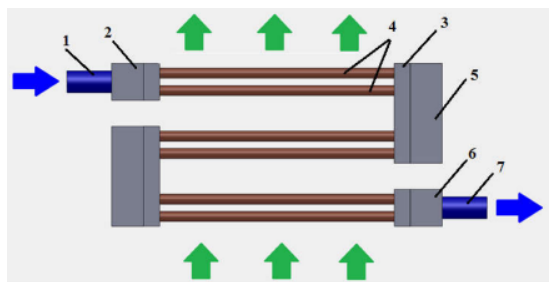
**For citation:** Aleksei M. Belov, Sofya S. Gonyaeva, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov, Numerical simulation of hydrodynamic processes in the outboard heat exchanger, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 87—91.

### Введение

Одним из направлений повышения безопасности ядерных реакторов морских объектов является использование систем аварийного расхолаживания (САР) с неограниченным временем действия. На кафедре судовой ядерной и водородной энергетики СПбГМТУ созданы инжекторные системы аварийного расхолаживания, которые позволяют отводить остаточное тепловыделение к забортной воде. В таких системах особые требования предъявляются к забортному теплообменнику (ЗТО). В частности, ЗТО должен обладать невысоким

гидравлическим сопротивлением по забортной воде. Этим требованиям в значительной степени отвечает ЗТО, конструкция которого предложена в патенте [1].

Схема такого ЗТО представлена на рисунке 1. Теплообменный аппарат состоит из горизонтальных секций идентичных между собой, в каждой из которых имеется один или несколько слоев труб. Трубы расположены в шахматном порядке (рисунок 2). Находящиеся по бокам коллекторы собирают теплоноситель из труб одной секции и раздают по трубам другой секции.



1 – входной патрубок; 2 – входной коллектор; 3 – трубные решетки; 4 – слои труб; 5 – промежуточный коллектор; 6 – выходной коллектор; 7 – выходной патрубок.

Рис. 1 - Теплообменный аппарат с двумя параллельными и шестью общими слоями труб со схемой движения потоков охлаждаемой и охлаждающей сред.

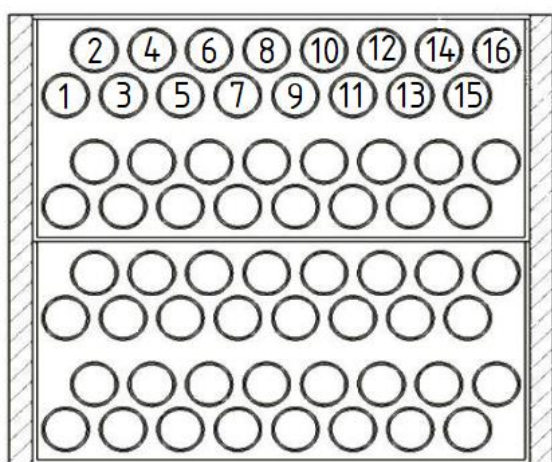


Рис. 2 – Шахматное расположение и нумерация труб выходящих из коллектора в теплообменном аппарате с двумя параллельными слоями труб и восьмью общими слоями труб

В данном теплообменном аппарате заборная вода движется снизу-вверх в межтрубном пространстве. Поперечное обтекание труб, с одной стороны, гарантирует более эффективную теплоотдачу, с другой стороны, межтрубное пространство позволяет обеспечить небольшое гидравлическое сопротивление, что дает возможность обеспечивать естественную циркуляцию по заборной воде даже при ее небольшом подогреве [2-5].

Кроме того, такая конструкция заборного теплообменного аппарата обеспечивает противоток, что увеличивает температурный напор.

### 1 Постановка задачи исследования

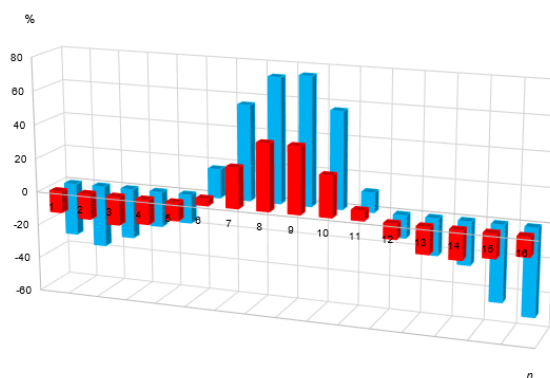
Основными целями исследования являются:

- определение равномерности раздачи охлаждаемой воды по трубкам в ЗТО;
- определение величины гидравлического сопротивления ЗТО.

Гидравлические расчеты проводились в программной системе анализа методом конечных элементов Ansys Fluent.

Предварительные расчеты показали, что перед входным коллектором необходим диффузор. Он существенно снижает неравномерность раздачи

охлаждаемой воды по трубкам во входном коллекторе (рисунок 3).



Красный цвет – коллектор с диффузором; синий цвет – коллектор без диффузора.

Рис. 3 – Отклонение от среднего расхода во входном коллекторе

### 2 Расчет полости теплоносителя заборного теплообменного аппарата

Таким образом, для исследования был принят ЗТО, представленный на рисунке 4.

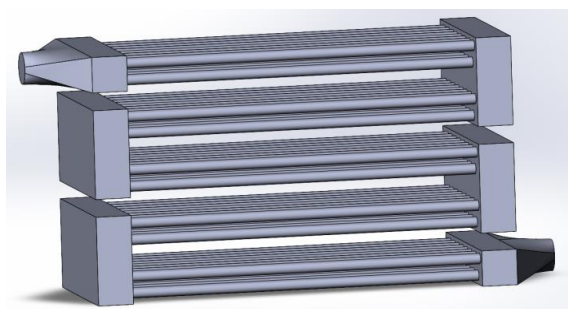


Рис. 4 – Конструкция заборного теплообменного аппарата

Задача исследования была приведена к решению системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненной системой уравнений k- $\omega$  SST модели турбулентности Менера во всереинольдсовою постановке [6].

Для расчета была построена мозаичная сетка. Мозаичная технология позволяет создавать полиэдрические соединения между различными типами сеток. Недавно введенный метод Poly-Nexcore первым вообрал в себя эту методику для соединения вытянутых многогранных призм на границе со структурированными выровненными гексаэдрами в основном объеме [7].

Используя высококачественные полиэдрические и гексаэдрические элементы в основном объеме, эта сетка автоматически и конформно делает переход к призматическому пристеночному слою. Гексаэдрические элементы желательны из-за их точности и эффективности. Сетка из гексаэдрических элементов при том же разрешении позволяет уменьшить количество граней (рисунок 5). Чем ниже количество граней, тем быстрее выполняется расчёт и тем меньше требований к оперативной памяти и дисковому пространству [8].

Общее количество расчетных ячеек в модели составляло около 3,1 млн. ячеек.

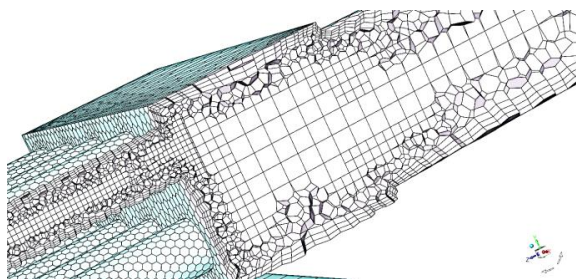


Рис. 5 – Расчетная сетка

Для расчета раздачи коллекторов были созданы срезы на каждой трубке, расположенные посередине длины трубы и ориентированные перпендикулярно течению среды, таким образом это позволит определить расход в каждой трубке, путем взятия поверхностного интеграла, по ограниченной срезом площади.

В ходе расчета были приняты следующие граничные условия:

- расход рабочей среды на входе 0,5794 кг/с;
- плотность рабочей среды 983,2 кг/м<sup>3</sup>;
- вязкость рабочей среды 0,00047 Па·с.

### 3 Результат расчета

Расчет показал, что при заданном расходе гидравлическое сопротивление охлаждаемого тракта составляет 12,90 кПа.

Результаты расчета расходов и неравномерности раздачи распределения представлены в таблицах 1, 2 и на рисунках 6, 7.

Неравномерность раздачи первого коллектора обусловлена геометрией подвода среды (рисунок 3). Начиная со второго коллектора распределение расходов выравнивается (рисунки 6, 7).

Таблица 1

#### Расходы в коллекторах

| Наименование                        | Значение |
|-------------------------------------|----------|
| Первый коллектор                    |          |
| Максимальный расход в трубках, кг/с | 0,0504   |
| Минимальный расход в трубках, кг/с  | 0,0301   |
| Второй коллектор                    |          |
| Максимальный расход в трубках, кг/с | 0,0391   |
| Минимальный расход в трубках, кг/с  | 0,0337   |
| Третий коллектор                    |          |
| Максимальный расход в трубках, кг/с | 0,0388   |
| Минимальный расход в трубках, кг/с  | 0,0335   |
| Четвертый коллектор                 |          |
| Максимальный расход в трубках, кг/с | 0,0387   |
| Минимальный расход в трубках, кг/с  | 0,0338   |
| Пятый коллектор                     |          |
| Максимальный расход в трубках, кг/с | 0,0385   |
| Минимальный расход в трубках, кг/с  | 0,0339   |

Таблица 2

#### Отклонения расхода в коллекторах от среднего значения

| Наименование  | Значение |
|---|----------|
| Первый коллектор  |          |
| Отклонение максимального расхода от среднего расхода, % | 39,32    |
| Отклонение минимального расхода от среднего расхода, %  | -16,81   |
| Второй коллектор  |          |
| Отклонение максимального расхода от среднего расхода, % | 6,79     |
| Отклонение минимального расхода от среднего расхода, %  | -7,9     |
| Третий коллектор  |          |
| Отклонение максимального расхода от среднего расхода, % | 7,03     |
| Отклонение минимального расхода от среднего расхода, %  | -7,56    |
| Четвертый коллектор                                     |          |
| Отклонение максимального расхода от среднего расхода, % | 6,69     |
| Отклонение минимального расхода от среднего расхода, %  | -6,83    |
| Пятый коллектор   |          |
| Отклонение максимального расхода от среднего расхода, % | 6,46     |
| Отклонение минимального расхода от среднего расхода, %  | -6,35    |

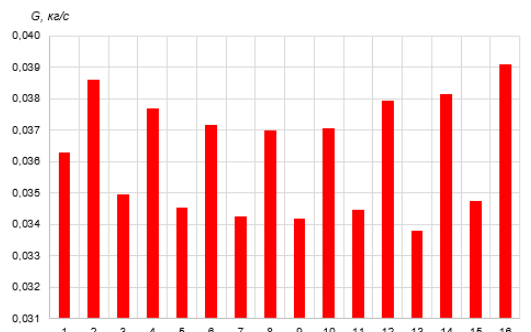


Рис. 6 – Расход в трубках после второго коллектора

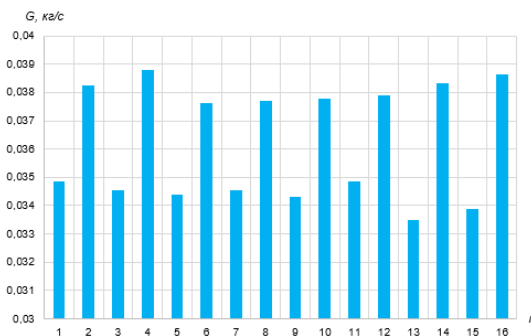


Рис. 7 – Расход в трубках после третьего коллектора

Поэтому дальнейшее выравнивание раздачи по трубкам в первом коллекторе (за счет увеличения длины диффузора, установки в диффузоре разделительных стенок, лопаток и т.п.), вероятно, следует считать нецелесообразным.

Однако во всех коллекторах в трубках нижнего ряда расход на 13-15% меньше чем в трубках верхнего ряда. Это связано с поворотом потока в коллекторах и расположением труб в виде шахматного пучка.

На рисунке 8 представлено поле давлений. В качестве сечения для построения визуального поля давления была выбрана плоскость коллекторов и поперечное сечение центральных трубок. Исследование показало, что, наибольшие гидравлические потери наблюдаются во входном коллекторе и двух верхних рядах трубок.

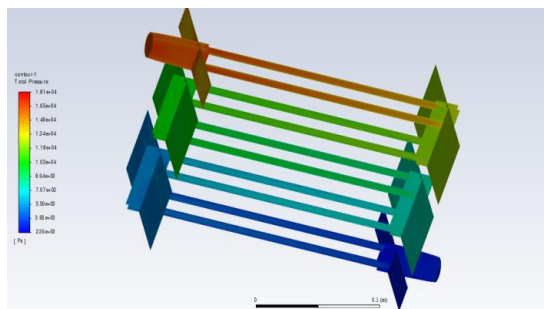


Рис. 8 – Поле давлений ЗТО

На рисунке 9 показаны траектории движения частиц расчетной сетки, цветом показана скорость частиц. Отмечено, что в трубках по большей части движение прямолинейное, без завихрений. В коллекторах из-за необходимости передачи теплоносителя следующим трубкам и изменения направления движения возникают локальные завихрения. Особенно ярко выражено завихрение во входном коллекторе при подходе к первому пучку труб. Завихрения образуются из-за геометрии подвода, который также имеет меньшее проходное сечение. Как следствие, в центральной части расход больше, чем на периферии.

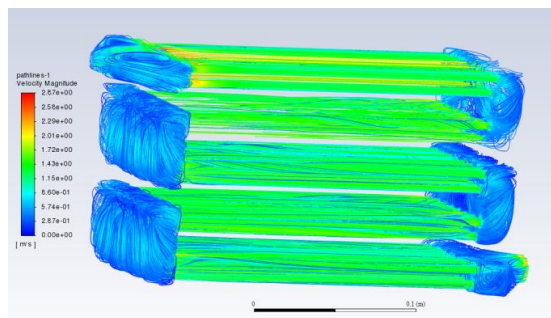


Рис. 9 – Поле скоростей в ЗТО

### Заключение

Численное моделирование проточной части теплоносителя забортного теплообменного аппарата выполнено в программном комплексе Ansys Fluent.

Для улучшения сходимости и уменьшения времени проведения расчетов была использована мозаичная стека, состоящая из высококачественных полиэдрических и гексаэдрических элементов в основном объеме, построенная по методике Poly-Nexcore.

Предварительные расчеты показали, что перед входным коллектором целесообразно установить диффузор. Он существенно снижает неравномерность раздачи среды по трубкам во входном коллекторе.

Начиная со второго коллектора, раздача теплоносителя по трубкам выравнивается.

Установлено, что расход в трубках нижнего ряда на 13-15% меньше чем в трубках верхнего ряда.

Отмечено, что в трубках по большей части движение прямолинейное, без завихрений. В коллекторах из-за необходимости передачи теплоносителя следующим трубкам и изменения направления движения возникают локальные завихрения. Особенно ярко выражено завихрение во входном коллекторе при подходе к первому пучку труб.

### Литература

1. Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Аполлова А.В., Зязин Д.М. Теплообменный аппарат. Патент на полезную модель № 176496. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации, 2017.
2. Кожемякин В.В., Аполлова А.В. Определение средней температуры воды в забортном теплообменнике // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. - № 4 (38), Т.1. - С. 141-146.
3. Кожемякин В.В., Аполлова А.В., Игнатъева Е.С., Иванов Р.А. Расчетно-теоретическое исследование конструктивных характеристик забортного теплообменного аппарата // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. - № 1 (43), Т.1. - С. 83-87.
4. Кожемякин В.В., Аполлова А.В., Игнатъева Е.С. Программа конструктивного расчета забортного теплообменника. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611952. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации, 2019.
5. Аполлова А.В. Забортный теплообменник с горизонтальным расположением труб // ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВО – 2018. - № 4, Т.18. Изд-во: Международный институт промышленной собственности (Москва). – С. 23-30.
6. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. унта, 2012. – 88 с.
7. Ansys "5 Best Practices for Gas Turbine Combustion Meshing Using Ansys Fluent". Analysis and Development of Safety-Critical Embedded Systems. White Paper, pp. 1-6, 2020.
8. Ansys «Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution» White Paper, pp. 1-8, 2018.

### References

1. V. V. Kozhemyakin, D. N. Shamanov, A. V. Apollova, and D. M. Zyazin, Russ. Heat exchanger. Utility model patent No. 176496. Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks of the Russian Federation, 2017.
2. Kozhemyakin V.V., Apollova A.V. Determination of the average water temperature in the outboard heat exchanger // Marine Intelligent Technologies. - 2017. - No. 4 (38), V.1. - S. 141-146.
3. V. V. Kozhemyakin, A. V. Apollova, E. S. Ignatieva, and R. A. Ivanov, Russ. Calculation-theoretical study of the design characteristics of the outboard heat exchanger // Marine intellectual technologies. - 2019. - No. 1 (43), V.1. - S. 83-87.
4. Kozhemyakin V.V., Apollova A.V., Ignatieva E.S. The program of constructive calculation of the outboard heat exchanger. Certificate of state registration of the computer program No. 2019611952. Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks of the Russian Federation, 2019.
5. Apollova A.V. Outboard heat exchanger with a horizontal arrangement of pipes // INVENTION - 2018. - No. 4, V.18. Publisher: International Institute of Industrial Property (Moscow). - S. 23-30.
6. Garbaruk A.V. Modeling of turbulence in calculations of complex flows: textbook / A.V. Garbaruk, M.Kh. Sagittarius, M.L. Shur - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic. unta, 2012. - 88 p.
7. Ansys "5 Best Practices for Gas Turbine Combustion Meshing Using Ansys Fluent". Analysis and Development of Safety-Critical Embedded Systems. White Paper, pp. 1-6, 2020.
8. Ansys "Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution" White Paper, pp. 1-8, 2018.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Алексей Михайлович Белов**, студент группы 2163, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская 3, e-mail: belov\_alj@mail.ru

**Софья Сергеевна Гоняева**, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru

**Вячеслав Вячеславович Кожемякин**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kogh2022@mail.ru

**Никита Александрович Морозов**, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

**Aleksei M. Belov**, student, group 2163, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, e-mail: belov\_alj@mail.ru

**Sofya S. Gonyaeva**, assistant of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru

**Vyacheslav V. Kozhemyakin**, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, the head of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kogh2022@mail.ru

**Nikita A. Morozov**, assistant of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 24.11.2022.

Научная статья

УДК 621.176, 629.036

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.011>

## Использование метано-воздушного и аммиачно-воздушного топлива в двигательно-движительном инжекторе

С.С. Гоняева<sup>1</sup> [sofja.gonyaeva@yandex.ru](mailto:sofja.gonyaeva@yandex.ru), В.В. Кожемякин<sup>1</sup> [kogh2022@mail.ru](mailto:kogh2022@mail.ru),  
Н.А. Морозов<sup>1</sup> [nikita.morozov99@mail.ru](mailto:nikita.morozov99@mail.ru)

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

**Аннотация.** Работа посвящена возможности использования метано-воздушного и аммиачно-воздушного топлива в двигательно-движительном инжекторе.

В работе разработана двигательно-движительная установка, состоящая из камеры сгорания и инжектора. В качестве инжектора используется пароводяной струйный аппарат (ПВСА), предназначенный для обеспечения циркуляции теплоносителя в первом контуре. Особенностью такого ПВСА является сверхкритическое течение среды в диффузоре. Пар для ПВСА можно получать, сжигая метан в воздухе или сжигая аммиак в воздухе.

В связи с тем, что наиболее существенное влияние на скорость смеси на выходе из диффузора оказывает давление на входе в ПВСА, проведено расчетно-теоретическое исследование по результатам которого сделан вывод, что минимальное давление на входе в ПВСА, при котором возможно сверхкритическое течение смеси на выходе из диффузора для аммиака требует существенно большего давления, чем для метана, однако аммиак обеспечивает более высокий уровень скоростей. Увеличение давления на входе в ПВСА также приводит к увеличению тяги.

**Ключевые слова:** пароводяной струйный аппарат, движитель, метано-воздушное топливо, аммиачно-воздушное топливо, критическое течение.

**Для цитирования:** Гоняева С.С., Кожемякин В.В., Морозов Н.А. Использование метано-воздушного и аммиачно-воздушного топлива в двигательно-движительном инжекторе, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 92—96.

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.011>

## Use of methane-air and ammonia-air fuel in propulsion injector

Sofya S. Gonyaeva<sup>1</sup> [sofja.gonyaeva@yandex.ru](mailto:sofja.gonyaeva@yandex.ru), Vyacheslav V. Kozhemyakin<sup>1</sup> [kogh2022@mail.ru](mailto:kogh2022@mail.ru),  
Nikita A. Morozov<sup>1</sup> [nikita.morozov99@mail.ru](mailto:nikita.morozov99@mail.ru)

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

**Abstract.** The work is devoted to the possibility of using methane-air and ammonia-air fuel in a propulsion injector.

The work developed a propulsion system consisting of a combustion chamber and an injector. As an injector, a steam-water jet apparatus (PVSA) is used, designed to ensure the circulation of the coolant in the primary circuit. A feature of such a PVA is the supercritical flow of the medium in the diffuser. Steam for PVA can be obtained by burning methane in air or by burning ammonia in air.

Due to the fact that the most significant influence on the velocity of the mixture at the outlet of the diffuser is exerted by the pressure at the inlet to the PVSA, a computational and theoretical study was carried out based on the results of which it was concluded that the minimum pressure at the inlet to the PVSA at which supercritical flow of the mixture at the outlet is possible from the diffuser for ammonia requires significantly more pressure than for methane, but ammonia provides a higher level of speed. An increase in pressure at the inlet to the PVA also leads to an increase in thrust.

**Key words:** steam-water jet apparatus, propulsion device, methane-air fuel, ammonia-air fuel, critical outflow.

**For citation:** Sofya S. Gonyaeva, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita A. Morozov, Use of methane-air and ammonia-air fuel in propulsion injector, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 92—96.

### Введение

На отечественных судах на подводных крыльях в качестве движителей используются гребные винты, позволяющие развивать скорость до 65 км/ч. Как следует из работы [1] на более высокой скорости следует использовать водометные движители – то есть вместо гребных винтов использовать реактивную струю.

Реактивную струю можно создать, например, в пароводяном струйном аппарате (ПВСА).

В традиционном ПВСА со сверхзвуковым паровым соплом на выходе из камеры смешения движется однофазная вода. В диффузоре

созданного для первого контура ПВСА с дозвуковым паровым соплом [2-7] движется сверхкритический двухфазный поток.

Поскольку тяга, создаваемая реактивной струей, равна произведению массового расхода на скорость истечения относительно окружающей среды, то сверхкритическое течение среды в диффузоре рассматриваемого ПВСА делает его особенно привлекательным как движителя. Необходимо, однако таким образом выбирать параметры ПВСА, чтобы скачка конденсации в диффузоре не было. В противном случае тяга уменьшится на порядок.

Пар для ПВСА можно получить различными способами, например, сжигая метан в воздухе.

Однако при этом в паровое сопло вместе с паром будет поступать азот, окись углерода и остатки кислорода.

Или можно сжигать аммиак в воздухе, в этом случае в паровое сопло вместе с паром будет поступать азот и остатки кислорода.

### 1 Постановка задачи исследования

Схема двигательной-двигательной установки представлена на рисунке 1.

Установка состоит из камеры сгорания и инжектора.

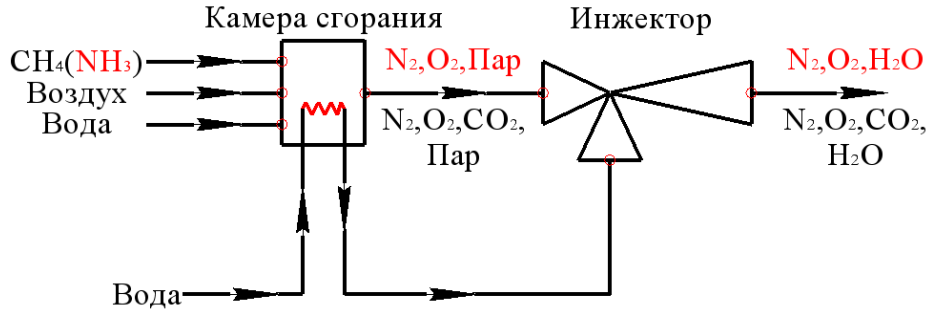


Рис. 1. Схема установки

В камеру сгорания поступает метан или аммиак, воздух и вода. Воздух подается с избытком, поэтому принято, что весь метан или аммиак полностью сгорает.

Был принят следующий состав воздуха:

$$N_2 \approx 0,768, O_2 \approx 0,232$$

Количество воды подается такое, чтобы на выходе из камеры сгорания пар имел параметры с энтальпией  $i''$  при парциальном давлении пара.

Пар с продуктами сгорания метана или аммиака подаются в паровое сопло ПВСА.

В водяное сопло инжектора подается забортная вода, подогретая за счет теплоты сгорания топлива в камере сгорания.

На выходе из цилиндрической камеры смешения устанавливается критическое истечение, далее в диффузоре идет сверхкритический разгон парогазоводяной смеси.

В настоящее время отсутствует математическая модель сверхкритического течения парогазоводяной смеси в диффузоре. В работе [8] была сделана попытка оценить скорость смеси на выходе из диффузора, полагая процесс в диффузоре политропным. Однако это не накладывало ограничения на скорость смеси. Поэтому в данной работе сделана попытка связать скорость смеси с работой расширения парогазоводяной смеси.

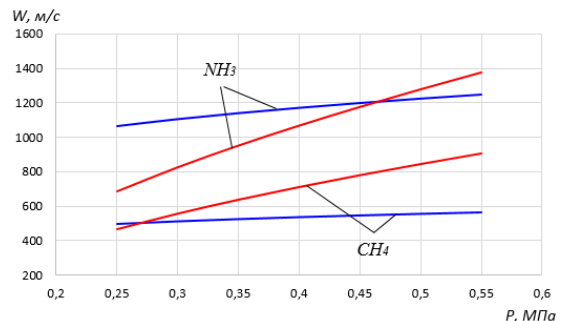
### 2. Проведение исследования

Для изучения возможности использования метано-воздушного и аммиачно-воздушного топлива в двигательной-двигательной установке разработана математическая модель и выполнено расчетно-теоретическое исследование.

В качестве базового взят вариант со следующими параметрами:

- расход метана 1 кг/с или расход аммиака 1 кг/с;
- скорость судна 0 км/ч;
- коэффициент избытка воздуха 1,1;
- давление воды и парогазовой смеси на входе в ПВСА одинаковое;
- давление на выходе из диффузора соответствует давлению на глубине 2 метра 0,12 МПа;
- недогрев воды на выходе из ПВСА при условии конденсации пара за скачком конденсации 10 °С.

Наиболее существенное влияние на скорость смеси на выходе из диффузора оказывает давление на входе в ПВСА. На рисунке 2 представлены зависимости скорости смеси на выходе из цилиндрического участка камеры смешения (синие линии) и скорости смеси на выходе из диффузора (красные линии) от давления на входе в ПВСА при недогреве воды до насыщения после конденсации 10 °С. Скорость на выходе из цилиндрического участка определяется уравнением для расхода ПВСА. Скорость на выходе из диффузора определяется работой расширения парогазовой смеси.



Синие линии – скорость смеси на выходе из цилиндрического участка камеры смешения, красные линии – скорость смеси на выходе из диффузора  
Рис. 2. Зависимость скорости парогазоводяной смеси от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 10 °С

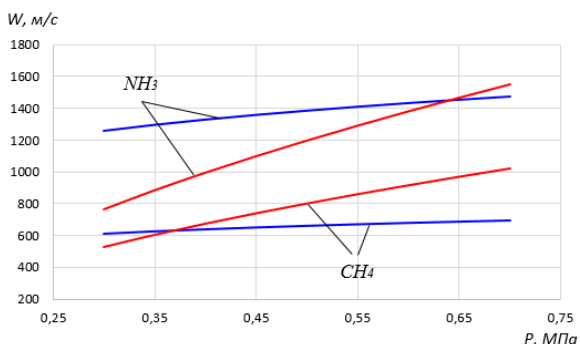
Точка пересечения линий определяет минимальное давление на входе в ПВСА, при котором возможно сверхкритическое течение смеси на выходе из диффузора.

Точка пересечения аммиака требует существенно большего давления, чем у метана, однако аммиак обеспечивает более высокий уровень скоростей.

На рисунке 3 представлены аналогичные зависимости при недогреве воды после конденсации пара 20 °С.

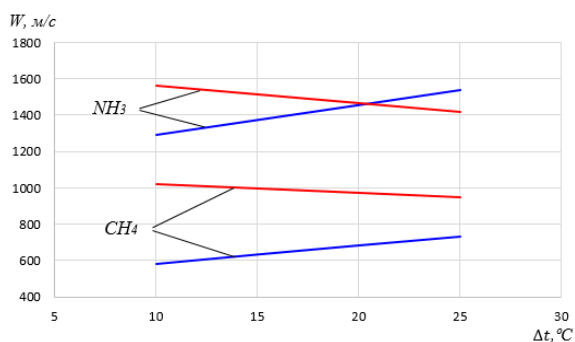
Как видно, из рисунка 3 повышение недогрева воды до насыщения после конденсации пара двигает точки пересечения в область более высоких давлений.

Из рисунков 2 и 3 также видно, что повышение недогрева воды до насыщения после конденсации пара увеличивает скорость парогазоводяной смеси.



Синие линии – скорость смеси на выходе из цилиндрического участка камеры смешения, красные линии – скорость смеси на выходе из диффузора  
Рис. 3. Зависимость скорости парогазоводяной смеси от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 20°C

Это иллюстрирует рисунок 4, на котором представлена зависимость скорости парогазоводяной смеси от недогрева воды на выходе из ПВСА при давлении в камере смешения 0,65 МПа.

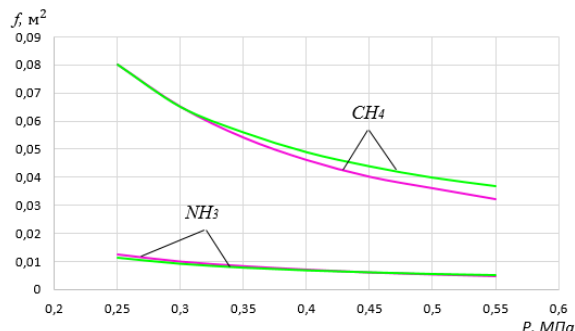


Синие линии – скорость смеси на выходе из цилиндрического участка камеры смешения, красные линии – скорость смеси на выходе из диффузора  
Рис. 4. Зависимость скорости парогазоводяной смеси от недогрева воды после конденсации пара при давлении на входе в ПВСА 0,65 МПа

Следует отметить, что скорость на выходе из диффузора на рисунках 2-4 – это скорость, которую может обеспечить работа расширения парогазовой смеси.

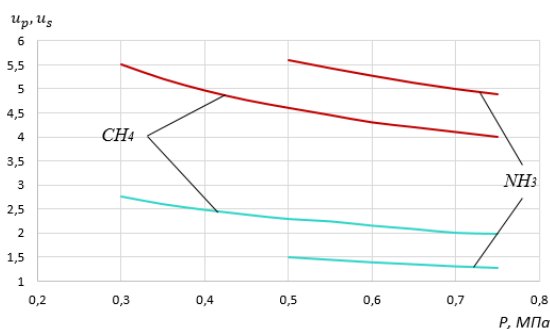
На рисунке 5 представлена зависимость площади от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 10°C.

Повышение давления на входе в ПВСА увеличивает работу расширения парогазовой смеси. С другой стороны, повышение давления при неизменном расходе горючего приводит к уменьшению площади поперечного сечения цилиндрической камеры смешения и как следствие, снижению коэффициента инжекции (рисунок 6).



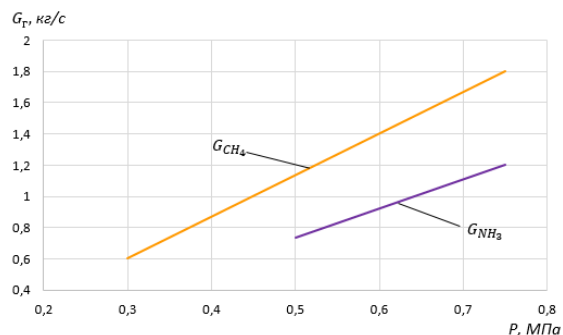
Розовые линии – площадь цилиндрической камеры, зеленые линии – площадь диффузора на выходе  
Рис. 5. Зависимость площади от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 10°C

На рисунке 6 представлена зависимость коэффициента инжекции от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 10°C.



Темно-красные линии – отношение массового расхода воды к массовому расходу пара, бирюзовые линии – отношение массового расхода воды к массовому расходу парогазовой смеси  
Рис. 6. Зависимость коэффициента инжекции от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 10°C

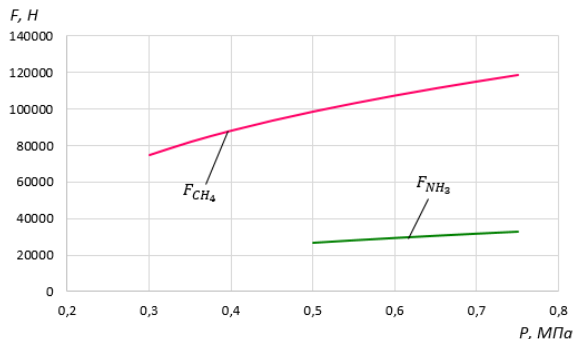
На рисунке 7 представлен график зависимости расхода газа от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 10°C.



Оранжевая линия – массовый расход метана, фиолетовая линия – массовый расход аммиака  
Рис. 7. Зависимость расхода горючего от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 10°C

Увеличение давления на входе в ПВСА приводит к уменьшению площади цилиндрической камеры, а, следовательно, это приводит к увеличению расхода горючего.

На рисунке 8 представлена зависимость тяги от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 10°C.



Лиловая линия – тяга инжектора с метано-воздушным топливом, темно-зеленая линия – тяга инжектора с аммиачно-воздушным топливом  
 Рис. 8. Зависимость тяги от давления на входе в ПВСА при недогреве воды после конденсации пара 10°C

Из рисунка 8 видно, что увеличение давления на входе в ПВСА, а также увеличение скорости на выходе из диффузора (рисунок 2) приводят к увеличению тяги.

Так как двигатель-двигательный инжектор с метано-воздушным топливом имеет большую площадь цилиндрической камеры это приводит к увеличению парогазоводяной смеси, что приводит к увеличению тяги на порядок по сравнению с двигатель-двигательным инжектором с аммиачно-воздушным топливом.

### Заключение

По результатам выполненного расчетно-теоретического исследования сделан вывод, что метано-воздушное и аммиачно-воздушное топливо можно использовать в двигатель-двигательном инжекторе.

Метано-воздушное топливо имеет меньшие скоростные характеристики, и сам ПВСА получается размерами больше.

Аммиачно-воздушное топливо имеет скоростные характеристики выше на порядок, а размеры ПВСА меньше.

Но в целом оба варианта полностью работоспособны.

### Литература

1. Зайцев Н.А., Маскалик А.И. Отечественные суда на подводных крыльях // Ленинград: Изд-во Судостроение, 1967.
2. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Шаманов Н.П. Экспериментальные исследования системы пассивного отвода тепла на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // Морские интеллектуальные технологии. 2018, № 4 (42) т. 1, с. 115 – 123.
3. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Тихомиров Б.А., Русаков Е.С. Экспериментальное исследование систем пассивного отвода тепла с ПВСА для реакторных установок // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 4 (46) т. 1, с. 123 – 129.
4. Игнатъева Е.С., Кожемякин В.В. Расчетно-теоретическое исследование работы пароводяного струйного аппарата при дополнительном подводе воды в камеру смешения // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 4 (46) т. 1, с. 148 – 152.
5. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Кожемякин В.О., Тихомиров Б.А. Безбойлерная система теплоснабжения с пароводяными струйными средствами циркуляции // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 1 (43) т. 3, с. 103 – 108.
6. Аполлова А.В., Гайсина А.О., Кожемякин В.В. Квазистатические характеристики системы пассивного отвода тепла // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 1 (43) т. 3, с. 115 – 121.
7. Гайсина А.О., Кожемякин В.В., Кожемякин В.О. Расчетно-теоретическое исследование зависимости давления от нагрузки при работе пароводяного струйного аппарата на статических характеристиках // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 4 (46) т. 1, с. 136 – 141.
8. Гоняева С.С., Калмыков А.Н., Кожемякин В.В., Кошкин Н.Д., Маловик Д.С., Морозов Н.А. Использование пароводяного струйного аппарата в качестве движителя на скоростных судах // Морские интеллектуальные технологии, 2022. №2 часть 2. с. 106 – 110.

### References

1. Zajcev N.A., Maskalik A.I. Otechestvennye suda na podvodnyh kryl' yah [Domestic hydrofoils]. Leningrad: Izd-vo Sudostroenie, 1967.
2. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Shamanov N.P. Eksperimental'nye issledovaniya sistemy passivnogo otvoda tepla na Primorskoy uchebno-nauchnoy baze SPbGMTU [Experimental studies of the passive heat removal system at the Primorsk educational and scientific base of St. Petersburg State Marine Technical University (SPBSMTU)]. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2018, № 4 (42) t. 1, s. 115 – 123.
3. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Tikhomirov B.A., Rusakov E.S. Eksperimental'noe issledovanie sistem passivnogo otvoda tepla s PVSA dlya reaktornykh ustanovok [Experimental investigations of the passive heat removal systems for reactor installations]. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 4 (46) t.1, s. 123 – 129.
4. Ignat'eva E.S., Kozhemyakin V.V. Raschetno-teoreticheskoe issledovanie raboty parovodyanogo struynogo apparata pri dopolnitel'nom podvode vody v kameru smesheniya [Computational and theoretical research work stem-water jet apparatus with additional water inlet to the mixing chamber]. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 4 (46) t.1, s. 148 – 152.

5. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Kozhemyakin V.O., Tikhomirov B.A. Bezboylernaya sistema teplosnabzheniya s parovodyanymi struynymi sredstvami tsirkulyatsii [Non-Boiler heat supply system with steam-water jet means of circulation]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 1 (43) t. 3, s. 103 – 108.
6. Apollova A.V., Gaysina A.O., Kozhemyakin V.V. Kvazistaticheskie kharakteristiki sistemy passivnogo otvoda tepla [Quasi-Static characteristics of the passive heat removal system]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 1 (43) t. 3, s. 115 – 121.
7. Gaysina A.O., Kozhemyakin V.V., Kozhemyakin V.O. Raschetno-teoreticheskoe issledovanie zavisimosti davleniya ot nagruzki pri rabote parovodyanogo struynogo apparata na staticheskikh kharakteristikakh [Calculation and theoretical study of the dependence of pressure on load when operating a steam-water jet apparatus on static characteristics]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 4 (46) t. 1, s. 136 – 141.
8. Gonjaeva S.S., Kalmykov A.N., Kozhemyakin V.V., Koshkin N.D., Malovik D.S., Morozov N.A. Ispol'zovanie parovodjanogo strujnogo apparata v kachestve dvizhitelja na skorostnyh sudah // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2022, №2 chast'2, s. 106 – 110.

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

**Софья Сергеевна Гоняева**, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru

**Вячеслав Вячеславович Кожемякин**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kogh2022@mail.ru

**Никита Александрович Морозов**, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

**Sofya S. Gonyaeva**, assistant of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru

**Vyacheslav V. Kozhemyakin**, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, the head of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kogh2022@mail.ru

**Nikita A. Morozov**, assistant of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 27.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Научная статья

УДК 621.371

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.012>

### О роли информационно-измерительных и управляющих систем при поиске объектов подводными аппаратами

В.Л. Мартынов<sup>1,2</sup> [martynovvoenmeh@mail.ru](mailto:martynovvoenmeh@mail.ru), Ю.Л. Сиек<sup>1</sup> [siek@mail.ru](mailto:siek@mail.ru), А.Н. Борисов<sup>1</sup>, [bor\\_fond93@mail.ru](mailto:bor_fond93@mail.ru)

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, <sup>2</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

**Аннотация.** В статье приводятся данные о поиске объектов подводными аппаратами. Проведён анализ физических основ подводного поиска, включающий исследование таких его составляющих, как средства обнаружения носителя информационно-измерительных и управляющих систем, морская среда и собственно объекты поиска. Направление этих исследований включало выявление особенностей функционирования бортовой аппаратуры подводных аппаратов в таких физических полях, как гидроакустическое и световое. В качестве одного из главных условий обнаружения целей в гидросфере предложено использовать информационно-измерительные и управляющие системы подводных аппаратов на выявление собственных физических полей объектов поиска, отличных по своему характеру от аналогичных полей окружающей среды. Исследовано распределение плотности вероятности значений сигналов и помехи в гидроакустическом поле. Обосновано, что для выявления объекта поиска в зоне действия, то есть видимости бортовых измерительных систем, необходимо и достаточно выявление наличия локальной неоднородности гидросферы, формируемых целями. Предложены системы, реализующие это условие.

**Ключевые слова:** подводный аппарат, подводный поиск, гидролокаторы бокового обзора, классификация объектов, информационно-измерительные и управляющие системы.

**Для цитирования** Мартынов В.Л., Сиек Ю.Л., Борисов А.Н. и др. О роли информационно-измерительных и управляющих систем при поиске объектов подводными аппаратами, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 97—102.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.012>

### On the role of information-measuring and control systems in the search for objects by underwater vehicles

Viktor L. Martynov<sup>1,2</sup> [martynovvoenmeh@mail.ru](mailto:martynovvoenmeh@mail.ru), Yuriy L. Siek<sup>1</sup> [siek@mail.ru](mailto:siek@mail.ru),

Aleksandr N. Borisov<sup>1</sup> [bor\\_fond93@mail.ru](mailto:bor_fond93@mail.ru)

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, <sup>2</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article provides data on the search of objects by underwater vehicles. An analysis of the physical foundations of underwater search, including the study of its components, such as the tools of detection of information-measuring and control systems, the marine environment and the search objects themselves, was carried out. The direction of these research included revealing of features of functioning of onboard equipment of underwater vehicles in such physical fields, as hydroacoustic and light. As one of the main conditions of target detection in hydrosphere, it was proposed to use information-measuring and control systems of underwater vehicles to detect their own physical fields of search objects, different in character from the similar fields of the environment. The probability density distribution of signals and interference in the hydroacoustic field is investigated. It is shown that for the detection of the search object around operation, that is, the visibility of on-board measuring systems, it is necessary and sufficient to identify the presence of local heterogeneity of the hydrosphere, formed by the targets. The systems that implement this condition are proposed.

**Key words:** underwater vehicle, underwater search, side-scan sonar, object classification, information-measuring and control systems.

**For citation:** Viktor L. Martynov, Yuriy L. Siek, Aleksandr N. Borisov The role of onboard sonar and television systems in underwater object search by underwater vehicles, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 97—102.

#### Введение

Литература, освещающая основы ведения поиска в различных средах, достаточно обширна. Общим в ней является то, что все виды этой деятельности объединены одним общим свойством - конечной

целью, в качестве которой выступает получение определенной информации, а сам процесс ее получения и представляет собой поиск.

Тем не менее, изложение теории такого вида поиска, как подводный, встречается редко. Список источников здесь ограничен. Учитывая важность

проблемы, связанной с поиском реальных объектов, авторы [1] считают целесообразным рассматривать его в качестве самостоятельной научной дисциплины.

Анализ специальной литературы приводит к выводу, что основной целью теории поиска является разработка и обоснование оптимальных способов обнаружения разнообразных объектов с использованием информационно-измерительных и управляющих систем [2-5].

Обоснование путей эффективности проведения поисковых мероприятий показало, что среди различных средств достижения этой цели наиболее значимым при ведении подводного поиска является анализ его физических основ, включающий рассмотрение:

- объектов поиска;
- средств обнаружения;
- среды поиска.

Руководствуясь сказанным, целесообразно выделить, обобщить и применить при проектировании научно-исследовательских подводных аппаратов (ПА) специфические особенности таких разных, на первый взгляд, дисциплин, как теория средств обнаружения (гидроакустика, телевидение), теория проектирования информационно-измерительных и управляющих систем, теория физических полей различных объектов, теория маневрирования, теория распространения света в водной среде, включая световые потоки, формируемые лазерными осветителями.

Знание и умелое применение основных положений этих дисциплин в сочетании с практическим опытом проектирования и эксплуатации средств подводного поиска позволят успешно решить задачу повышения поискового потенциала ПА. Тем самым теория поиска в своем развитии пополнится новыми способами обнаружения объектов, обеспечивающими решение ее основной задачи - обнаружения этих объектов в кратчайшее или заданное время при минимальных затратах усилий.

#### Физические основы подводного поиска

Анализируя физические основы поиска [1-5], включающие рассмотрение среды его проведения, объектов, а также средств обнаружения, можно отметить, что результат проведения поисковых операций одних и тех же объектов в одних и тех же водных акваториях для различных ПА будет зависеть от того, какими средствами обнаружения те оснащены. Наличие определенного состава технических средств будет диктовать выработку оптимальной последовательности действий, составляющих алгоритм поиска.

Создание таких алгоритмов применительно к задаче повышения поискового потенциала ПА даст возможность определить направление научного исследования, обеспечивающего формирование на ПА оптимальной системы подводного поиска.

Существующий в настоящее время алгоритм поиска подводных объектов научно-исследовательскими подводными аппаратами не является оптимальным. К сожалению, разработчики и конструкторы подводных робототехнических комплексов не в должной мере учитывают

значимость и роль бортовых информационно-измерительных и управляющих систем. Расположенная в носовой части ПА телевизионная камера (ТВК) обеспечивает визуальный просмотр небольшой части пространства впереди по курсу, а ориентированные по бортам гидролокаторы бокового обзора (ГБО) не позволяют достоверно классифицировать акустический контакт с обнаруженными объектами. Зоны обзора пространства поисковыми средствами ПА приведены на рисунке 1:

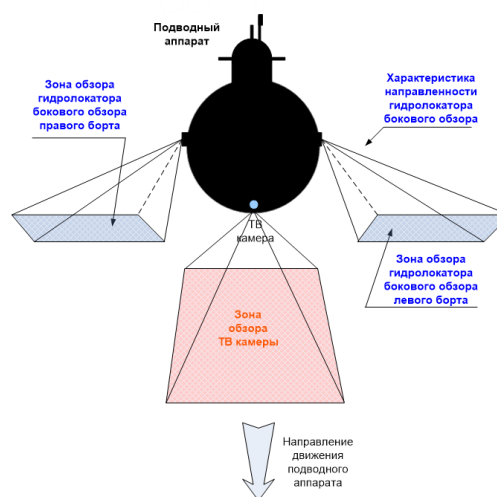


Рис. 1. Зоны обзора пространства поисковыми средствами ПА

Существующий состав поисковых технических средств дает возможность применить такой алгоритм, который априори не может быть эффективным. Причина - возможный пропуск объектов поиска. Это следует из того, что объект, находящийся на траверзах (по бортам) ПА, необходимо обнаружить гидролокатором бокового обзора и классифицировать, что может быть успешно реализовано с помощью информационно-измерительных и управляющих систем. Их применение существенно повышает возможность идентификации контакта с целями, обнаруженными в различных физических полях.

В соответствии с положениями теории обнаружения объектов необходимым условием его обнаружения является либо наличие у объекта собственных физических полей, отличных по своему характеру от аналогичных полей окружающей среды, либо способность объекта особым образом деформировать внешние по отношению к нему поля. Окружающая среда также способна деформировать в той или иной степени любое из физических полей. Очевидно, что объект может быть обнаружен в воде лишь в том случае, если он деформирует внешние или излучает собственные поля иначе, чем водная среда, то есть если он является локальной неоднородностью среды.

Локальные неоднородности могут быть естественными неоднородностями среды и искусственными, созданными человеком - объектами поиска. Эти принципиально различные по природе неоднородности могут обладать сходными физическими параметрами. Данное обстоятельство усложняет поиск рукотворных объектов, являющихся

объектами поиска, в присутствии естественных неоднородностей, которые следует рассматривать как тела-помехи.

Наряду с полезной информацией, содержащей сведения об объектах поиска и являющейся сигналом, на акустические антенны ГБО поступает также информация, не содержащая данных сведений и представляющая собой помеху. Таким образом, на входе ГБО образуется «смесь» сигнала и помехи. Помехами являются флуктуации естественных полей, деформации этих полей, вызванные телами-помехами, шумы, возникающие в водной среде и аппаратуре, помехи от непосредственного воздействия на антенны ГБО излучаемого ГБО акустического поля, его флуктуаций и отражений от дна и придонных слоев воды. Этот вид помех в импульсных системах обнаружения, таких, как ГБО, имеет нестационарный (спадающий по времени) характер. Обнаружение акустического сигнала при мешающем воздействии нестационарных помех затруднительно.

### Помехи

Все виды помех представляют собой случайные колебания и вызывают появление на выходе детектора напряжения  $U$ , величина которого распределена по закону Рэлея [3]:

$$W_n\left(\frac{U}{\sigma_n}\right) = \frac{U}{\sigma_n^2} \cdot e^{-\frac{U^2}{2\sigma_n^2}} \quad (1)$$

где:

$$W_n\left(\frac{U}{\sigma_n}\right) - \text{плотность вероятности величины } \frac{U}{\sigma_n},$$

то есть вероятная частота появления того или иного значения этой величины;

$U$  – мгновенное значение напряжения на выходе детектора;

$\sigma_n$  – среднеквадратическое значение напряжения помехи на выходе детектора.

График распределения помехи представлен кривой 1 на рисунке 2.

Смесь сигнала и помехи также представляет собой случайную величину, огибающая которой при сильном сигнале постоянной амплитуды  $U_{mc}$  распределена по закону Райса (обобщенный закон Рэлея) [3]:

$$W_{nc}\left(\frac{U}{\sigma_n}\right) = \frac{U}{\sigma_n^2} \cdot e^{-\frac{1}{2}(U^2 + U_{mc}^2)} \cdot I_0\left(\frac{U}{\sigma_n}, \frac{U_{mc}}{\sigma_n}\right) \quad (2)$$

где:

$$I_0\left(\frac{U}{\sigma_n}, \frac{U_{mc}}{\sigma_n}\right) - \text{функция Бесселя нулевого}$$

порядка от мнимого аргумента.

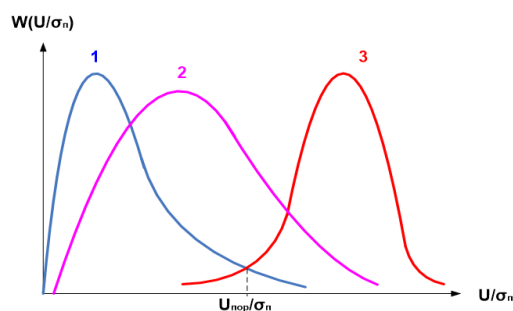


Рис. 2. Распределение плотности вероятности значений сигнала и помехи на входе гидролокатора бокового обзора (пороговый уровень выбран по критерию Неймана-Пирсона).

Здесь:

- 1 – распределение помехи;
- 2 – распределение «помеха плюс слабый сигнал»;
- 3 – распределение «помеха плюс сильный сигнал».

В случае слабого сигнала ( $\frac{U_{mc}}{\sigma_n} \ll 1$ ) функция

Бесселя равна:

$$I_0\left(\frac{U}{\sigma_n}, \frac{U_{mc}}{\sigma_n}\right) = e^{\frac{U^2 \cdot U_{mc}^2}{4\sigma_n^2}} \quad (3)$$

и выражение (2) для распределения помехи плюс слабого сигнала будет иметь вид:

$$W_{nc}\left(\frac{U}{\sigma_n}\right) = \frac{U}{\sigma_n^2} \cdot e^{-\frac{1}{2}(U^2 + U_{mc}^2)} \cdot e^{\frac{U^2 \cdot U_{mc}^2}{4\sigma_n^2}} \quad (4)$$

График распределения смеси слабого сигнала и помехи представлен на рисунке 2 кривой 2.

Выражение для смеси «помеха плюс сильный сигнал» имеет вид [3]:

$$W_{nc}\left(\frac{U}{\sigma_n}\right) = \frac{U}{\sigma_n^2 + \sigma_c^2} \cdot e^{-\frac{U^2}{2(\sigma_n^2 + \sigma_c^2)}} \quad (5)$$

где:

$\sigma_c$  – среднеквадратическое значение напряжения сигнала на выходе детектора.

График распределения смеси сильного сигнала и помехи представлен на рисунке 2 кривой 3.

Из рисунка 2 видно, что возможны случаи, когда минимальные, и даже средние значения помехи будут заходить в область минимальных и средних значений сигнала. При этом возможны ошибочные решения. Например, помеха, имеющая большую величину, может быть принята за сигнал, а сигнал небольшой величины может быть принят за помеху. В первом случае может быть ложная тревога при обнаружении сигнала, во втором – пропуск сигнала.

### Опознавание объекта поиска

После принятия решения об обнаружении сигнала осуществляется операция первичного опознавания (или классификации) объекта средствами гидроакустики. Качество выполнения этой операции зависит от силы сигнала и количества используемых для этого характерных его признаков [6].

Статистические признаки, характеризующие объект, непостоянны, зависят от его типа и расположения, от режимов работы ГБО и имеют распределения, аналогичные распределениям на рисунке 2. Помехой в операции опознавания или классификации является сигнал от тела-помехи, признаки которого имеют распределения, подобные распределениям аналогичных признаков сигнала от объекта.

Решение в операции опознавания принимается по каждому признаку в отдельности, и на основании этих частных решений утверждается окончательное решение об опознавании объекта. Иными словами, принимается решение о том, что в зоне обнаружения системы подводного поиска (СПП) имеется локальная неоднородность и эта неоднородность является определенным типом объекта поиска.

Вторичное опознавание осуществляется средствами подводного телевидения ПА. Для этого ПА должен изменить курс, приблизиться к цели на расстояние, определяемое возможностями видения бортовых телевизионных средств, рассмотреть ее визуально и, в случае несоответствия цели объекту, вернуться обратно.

Приведенный алгоритм представлен на рисунке 3:

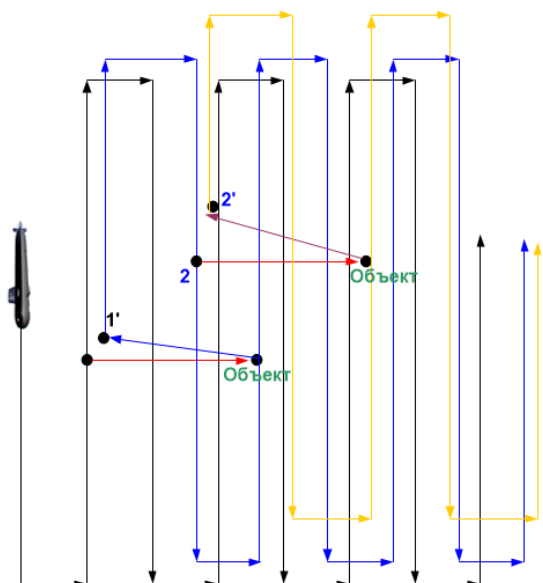


Рис. 3. Алгоритм поиска, реализованный в схеме маневрирования подводного аппарата

Здесь черным цветом показан заданный курс маневрирования, а синим и желтым цветом – курсы, смещенные относительно заданного вследствие ошибок навигационного счисления. Точками «1» и «2» обозначены позиции ПА в момент начала маневра сближения с объектом для его визуального осмотра. Точками «1'» и «2'» обозначены позиции ПА при возвращении в исходное место до начала

маневра сближения. Как следует из рис. 3, расстояния «1...1'» и «2...2'» характеризуют ошибки навигационного счисления места ПА, наличие которых может привести к пропуску одиночных объектов.

Необходимость сближения ПА с объектами поиска вызвана низкой информативной возможностью ГБО, что подтверждается рисунке 4:

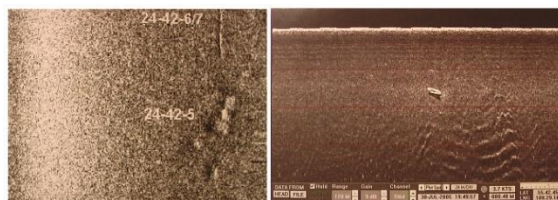


Рис. 4. Изображение на мониторах объектов, обнаруженных гидролокатором бокового обзора

При реализации рассмотренного алгоритма поиска (рис. 3) вопрос повышения поисковой производительности ПА строится лишь на применении различных вариантов его маневрирования, где решающая роль отводится точности навигационной прокладки курса.

Схема представлена с учетом того, что положение ПА определяется с высокой точностью на поверхности воды по данным GPS/ГЛОНАСС.

Кроме того, серьезным недостатком алгоритма (рисунок 3) является то, что зоны просмотра грунта телекамерой должны перекрываться, чтобы не было пропуска малоразмерных объектов, что показано на рисунке 5:

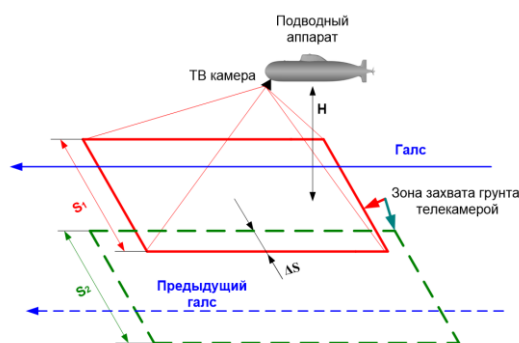


Рис. 5. Поиск точечных объектов с перекрытием зон визуального просмотра

Здесь:

$S_1, S_2$  – полоса по фронту ПА, просматриваемая телекамерой на разных галсах (курсах);

$\Delta S$  – ширина полосы перекрытия зон захвата грунта телекамерой;

$H$  – отстояние (расстояние) ПА от грунта.

При подводном поиске реализуется особенная форма маневрирования. Эта особенность проявляется в том, что придонное плавание является потенциально опасным и скорости ПА малы. Кроме того, визуальный просмотр дна телевизионными средствами производится в малой полосе по фронту - примерно 5...6 метров, на отстоянии ПА от грунта  $H = 10$  метров, угле поля зрения объектива  $\theta = 30^\circ \dots 40^\circ$  и выполняется с перекрытием зон обзора. Больше отстояние ПА от грунта проблематично вследствие ограничения в возможности телекамеры наблюдать объекты в

условиях ограничения видимости в воде. Это предъявляет высокие требования к точности навигационной прокладки курса. Указанные особенности являются причиной того, что поисковая производительность с рассмотренным алгоритмом ПА (рис. 3) невысока.

### Заключение

С учетом изложенного оптимальное использование поисковых ресурсов обосновывает вывод о том, что радиоэлектронные средства ПА, образующие систему подводного поиска, должны совокупно представлять собой интеграцию устройств, функционально объединенных между собой для его эффективного проведения, работа которых базируется на эффективном применении информационно-измерительных и управляющих систем. Указанная интеграция должна быть ориентирована на формирование так называемой интегрированной системы оценки подводной обстановки [7,8, 9, 10].

Интеграция предполагает такой алгоритм подводного поиска, при котором исключалась бы необходимость изменения маршрута движения ПА

для визуального просмотра обнаруженных объектов. Кроме того, эффективность выполняемых поисковых мероприятий должна быть не ниже заданной.

Таким образом, основным направлением работ в повышении поисковых возможностей ПА является решение научной проблемы по формированию его интегрированной системы оценки подводной обстановки. Для ее формирования необходимо исследовать потенциальные возможности, расчетным путем обосновать эффект и ввести в состав ПА техническое средство, которое, являясь связующим звеном между средствами дальнего и ближнего поиска (гидроакустика и телевидение соответственно), обеспечило бы визуальный просмотр объектов на больших дальностях по координатам гидроакустического тракта бокового обзора. Таким связующим звеном является лазерный канал передачи сигналов управления и видео, а техническим средством его реализации должен стать лазерный осветитель. Это обеспечит эффективное выполнение поисковых действий.

### Литература

1. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. - Москва: Сов. радио, 1977. 334 с.
2. Емельянов Л.А. и др. Теория поиска в военном деле. - Москва: Воениздат, 1964. 208 с.
3. Жуков Р.Ф., Кондратович А.А. и др. Системы, приборы и устройства подводного поиска. - Москва: Воениздат, 1972. 182 с.
4. Абчук В.А., Матвейчук Ф.А. и др. Введение в теорию выработки решений. - Москва : Воениздат, 1972. 342 с.
5. Дикарев В.И. и др. Методы и средства обнаружения объектов в укрывающихся средах. - СПб. Наука и техника. 2004. 280 с.
6. Мартынов В. Л., Дмитриев М. В., Прохоров В. Н. Основы расчёта телевизионных систем подводного видения // Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА - 2020). Изд-во «Политех-пресс». Санкт-Петербург. 2020 г. С. 262-266.
7. Martynov V.L., Golosnoy A.S., Sergeev S.M. Wireless optical communication channel in the hydrosphere as an alternative of communication by cable// Системы управления и информационные технологии, №1 (83), 2021. – С. 63-66, DOI: 10.36622/VSTU. 2921.83.1.01.
8. Мартынов В. Л., Сиек Ю. Л., Борисов А. Н. Методика практического расчёта телевизионных коммуникаций подводных аппаратов // Морские интеллектуальные технологии, № 2, том 3, сквозной номер 52, ISSN № 2588-0233, ISSN № 2073-7173, 2021. – С. 117-123.
9. Исследование эффективности подводных телекоммуникационных систем робототехнических комплексов по критерию ослабления интенсивности лазерного излучения / В. Л. Мартынов, И. Л. Скрипник, Ю. Г. Ксенофонтов [и др.] // Информатизация и связь. – 2021. – № 2. – С. 139-145. – DOI 10.34219/2078-8320-2021-12-2-139-145.
10. Системы технического зрения как разновидность инфотелекоммуникаций в вопросах экологического мониторинга водной среды / В. Л. Мартынов, Ю. Г. Ксенофонтов, Н. М. Божук [и др.] // Информатизация и связь. – 2022. – № 1. – С. 114-119. – DOI 10.34219/2078-8320-2022-13-1-114-119.

### References

1. Abchuk V.A., Suzdal' V.G. Poisk ob"ektov [Search for objects]. Moskva: Sov. radio, 1977. 334 s.
2. Emel'yanov L.A. i dr. Teoriya poiska v voennom dele [The theory of search in military affairs]. Moskva: Voenizdat, 1964. 208 s.
3. Zhukov R.F., Kondratovich A.A. i dr. Sistemy, pribory i ustroystva podvodnogo poiska [Underwater search systems, instruments and devices]. Moskva: Voenizdat, 1972. 182 s.
4. Abchuk V.A., Matveychuk F.A. i dr. Vvedenie v teoriyu vyrabotki resheniy [Introduction to the theory of decision making]. Moskva : Voenizdat, 1972. 342 s.
5. Dikarev V.I. i dr. Metody i sredstva obnaruzheniya ob"ektov v ukryvayushchikhsya sredakh [Methods and means of detecting objects in hiding environments]. SPb. Nauka i tekhnika. 2004. 280 s.
6. Martynov V. L., Dmitriev M. V., Prokhorov V. N. Osnovy rascheta televizionnykh sistem podvodnogo videniya [Fundamentals of calculation of underwater vision television systems] // Trudy Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki» (GA - 2020). Izd-vo «Politekhn-press». Sankt-Peterburg. 2020 g. S. 262-266.
7. Martynov V.L., Golosnoy A.S., Sergeev S.M. Wireless optical communication channel in the hydrosphere as an alternative of communication by cable// Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii, №1 (83), 2021. S. 63-66, DOI: 10.36622/VSTU. 2921.83.1.01.

8. Martynov V. L., Siek Yu. L., Borisov A. N. Metodika prakticheskogo rascheta televizionnykh kommunikatsiy podvodnykh apparatov [Method for practical calculation of underwater vehicle's television communications] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 2, tom 3, skvoznoy nomer 52, ISSN № 2588-0233, ISSN № 2073-7173, 2021. S. 117-123.
9. Issledovanie effektivnosti podvodnykh telekommunikatsionnykh sistem robototekhnicheskikh kompleksov po kriteriyu oslableniya intensivnosti lazernogo izlucheniya [Study of the efficiency of underwater telecommunication systems of robotic complexes according to the criterion of attenuation of laser radiation intensity]. V. L. Martynov, I. L. Skripnik, Yu. G. Ksenofontov [i dr.]. Informatizatsiya i svyaz'. 2021. № 2. S. 139-145. DOI 10.34219/2078-8320-2021-12-2-139-145.
10. Sistemy tekhnicheskogo zreniya kak raznovidnost' infotelekkommunikatsiy v voprosakh ekologicheskogo monitoringa vodnoy sredy [Vision systems as a type of infotelecommunications in environmental monitoring of the aquatic environment]. V. L. Martynov, Yu. G. Ksenofontov, N. M. Bozhuk [i dr.]. Informatizatsiya i svyaz'. 2022. № 1. S. 114-119. DOI 10.34219/2078-8320-2022-13-1-114-119.

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

**Виктор Леонидович Мартынов**, доктор технических наук, профессор кафедры Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

**Юрий Леонардович Сиек**, доктор технических наук, доцент, декан факультета морского приборостроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: siek@mail.ru

**Александр Николаевич Борисов**, старший преподаватель кафедры Систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: bor\_fond93@mail.ru

**Viktor L. Martynov**, Dr. Sci. (Eng)s, Professor of the Department of Radio Communication in the Navy, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

**Yuriy L. Siek**, Dr. Sci. (Eng)s, Dean of the Faculty of Marine Instrumentation, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: siek@mail.ru

**Aleksandr N. Borisov**, Senior Lecturer of the Department of Automatic Control Systems and Onboard Computer Facilities, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: bor\_fond93@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.11.2022.

Научная статья

УДК 623.82

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.013>

## Обеспечение надёжности интегрированных поисковых комплексов на базе информационно-измерительных и управляющих систем

В.Л. Мартынов<sup>1,2</sup> martynovvoenmeh@mail.ru, Ю.Л. Сиек<sup>1</sup> siek@mail.ru,  
С.Ю. Сакович<sup>1</sup> sergeysakovich@mail.ru, А.Н. Борисов<sup>1</sup>, bor\_fond93@mail.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, <sup>2</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

**Аннотация** Теории надёжности отводится одно из важных мест при проектировании и создании не только систем телекоммуникаций, но и всего радиоэлектронного оборудования подводных робототехнических комплексов (РТК), функционирующих на базе информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС). С учётом того, что вопросам телекоммуникаций отводится главная роль при обмене информацией между корреспондентами, их можно рассматривать в качестве неотъемлемой составной части интегрированной поисковой системы РТК, обеспечивающей выполнение одной из главных функций в звене его управления – поиска и классификации подводных объектов. Исследованию вопросов теории надёжности систем телекоммуникаций в составе интегрированных поисковых систем РТК, обоснованному математическими расчётами, посвящена данная статья. Представлена методика определения вероятности безотказной работы и наработки на отказ в зависимости от интенсивности отказов и количества информационных каналов, используемых в интегрированном поисковом комплексе (ИПК). Приведены результаты расчетов для наиболее типичных конфигураций ИПК. Предложенная методика может применяться для оценки надёжности ИИУС РТК.  
**Ключевые слова:** теория надёжности, телекоммуникационные системы, радиоэлектронное оборудование, информационно-измерительные и управляющие системы, подводные робототехнические комплексы, интегрированные поисковые системы.

**Для цитирования:** Мартынов В. Л., Сиек Ю.Л., Сакович С.Ю., Борисов А.Н. Обеспечение надёжности интегрированных поисковых комплексов на базе информационно-измерительных и управляющих систем, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 103—108.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.013>

## Ensuring the reliability of integrated search complexes based on information-measuring and control systems

Viktor L. Martynov<sup>1,2</sup> martynovvoenmeh@mail.ru, Yuriy L. Siek<sup>1</sup> siek@mail.ru,  
Sergej Ju. Sakovich<sup>1</sup> sergeysakovich@mail.ru, Aleksandr N. Borisov<sup>1</sup> bor\_fond93@mail.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, <sup>2</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Reliability theory occupies one of the most important places in the design of not only telecommunication systems, but also of all radio-electronic equipment of underwater robotic complexes (URC), functioning based on information-measuring and control systems (IMCS). Considering that telecommunication issues are given the main role in information exchange between correspondents, they can be considered as an important component of an integrated search system of URC, providing the performance of one of the main functions - search and classification of underwater objects. This article is devoted to the study of the reliability theory of telecommunications systems issues as part of integrated search engines, based on mathematical calculations. A methodology for determining the probability of no-failure operation depending on the failure rate and the number of information channels used in an integrated search complex (ISC) is presented. The results of calculations for the most typical configurations of the ISC are given. The proposed methodology can be applied to estimate the reliability of URC IMCS.

**Key words:** reliability theory, telecommunication systems, radio-electronic equipment, measuring and control systems, underwater robotic complexes, integrated search systems.

**For citation:** Viktor L. Martynov, Yuriy L. Siek, Sergej Ju. Sakovich, Aleksandr N. Borisov Ensuring the reliability of integrated search complexes based on information-measuring and control systems, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 103—108.

В теории надёжности различают надёжность систем и надёжность составляющих элементов. При этом системой называют совокупность совместно действующих объектов, предназначенную для совместного (независимого) выполнения установленного задания [1]. Опираясь на данное определение, термин «надёжность ИПС» эквивалентен термину «надёжность системы».

В соответствии с основами теории надёжности и эксплуатации аппаратуры телекоммуникаций, одним из её главных свойств является обеспечение выполнения задания по обнаружению целей в заданном районе, определяемое безотказностью и восстанавливаемостью [2]. Применительно к процессу поиска, восстанавливаемость обеспечивается многократным дублированием

поисковых средств. В дальнейшем, опираясь на данное пояснение, для упрощения рассмотрения вопросов надёжности телекоммуникационной системы, будем исследовать радиоэлектронные системы робототехнических комплексов (РТК) вне зависимости от их состава. Интеграция возможностей каждой из них и приводит к её условному названию – интегрированные поисковые комплексы (ИПК), функционирующие на базе информационно-измерительных и управляющих систем [3, 4, 5].

Функционирование всех составных частей ИПК направлено на решение одной задачи – в кратчайшее время выявить и с высокой степенью достоверности классифицировать объекты поиска посредством передачи энергетического контакта от одних поисковых средств другим, работающим в разных физических полях [6, 7]. Это увеличивает надёжность работы ИПК, так как поисковые средства РТК, ее составляющие, дублируют друг друга при решении им задач подводного поиска.

Сказанное прослеживается при рассмотрении таких понятий, как безотказность и долговечность, характеризующих надёжность. В частности, отказом называют полную или частичную потерю работоспособности системой [2]. С учетом того, что функционирование ИПК обеспечивают несколько информационных каналов РТК, среди которых, например, средства гидроакустики, технического зрения, включающего системы телевидения и освещения объектов поиска, а также телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (НПА), то отказ любого из них радикально не скажется на выполнении поисковой задачи. Вопрос

$$\lambda_c(t) = \frac{a(t)}{p(t)} = \frac{\frac{m(t)}{N \cdot t_n}}{\frac{[N - m(t)] \cdot t_n}{N \cdot t_n}} = \frac{m}{(N - m) \cdot t_n} \left( \frac{1}{\text{час}} \right) \quad (2)$$

где:

$m(t)$  – количество информативных каналов ИПК, отказавших в течение времени поиска;  $N$  – количество информативных каналов, составляющих ИПК;  $N=4$ ,  $t_n$  – время, в течение которого осуществляется поиск;  $a(t)$  – частота отказов.

Как видно из формулы (2), интенсивность отказов  $\lambda(t)$  представляет собой отношение частоты отказов ИПК к вероятности ее безотказной работы  $p(t)$ .

Важной характеристикой надёжности является наработка на отказ, принимая под этим среднее время  $T_0$  продолжительности работы ИПК между отказами ее подсистем – формула (3) из [1]:

$$T_0 = \int_0^{\infty} dt \cdot P_c(t) = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda_c(t) \cdot dt} \cdot dt \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), наработка на отказ  $T_0$  количественно представляет собой площадь,

будет заключаться только во времени её выполнения.

Понятие «надёжность» и ее составные части - «отказ», «работоспособность» и так далее являются качественными показателями, характеризующими работу ИПК на базе информационно-измерительных и управляющих систем. Для оценки надёжности используют количественные характеристики (критерии) надёжности [2, 8, 9]. Эти характеристики оценивают надёжность поисковой системы в течение всего срока ее службы. Лишь немногие из них являются постоянными и не имеют случайных отклонений под воздействием различных факторов.

Основной количественной мерой является вероятность безотказной работы  $P_c(t)$ , то есть вероятность того, что в определенных условиях эксплуатации в пределах заданной продолжительности работы  $t$  отказ не возникнет.

Вероятность безотказной работы определяется выражением (1) из [10]:

$$P_c(t) = e^{-\int_0^t \lambda_c(t) \cdot dt} \quad (1)$$

где:

$\lambda_c(t)$  – интенсивность отказов.

На практике характеристика  $\lambda_c(t)$  является наиболее широко используемой характеристикой надёжности. Интенсивность отказов – это величина, определяемая из соотношения (2), приведённого в [1]:

ограниченную функцией надёжности  $P_c(t)$  и осями координат.

По формулам (1)-(3) можно производить расчет количественных показателей надёжности ИПК. Однако предварительно выполним упрощения, которые не повлияют на результаты. Эти упрощения допустимы вследствие того, что назначенная наработка на отказ подсистем ИПК в соответствие с техническими заданиями на их разработку составляет  $T_0 \text{ ТЗ} = 10000$  часов. Поэтому продолжительность времени непрерывной работы ИПС при выполнении поиска в течение  $t_n = 72$  часов не считается величиной, соизмеримой с  $T_0 \text{ ТЗ}$ , то есть:

$$t_n \ll T_0 \text{ ТЗ}$$

На основании изложенного при выполнении расчетов показателей надёжности ИПК пользуются графиком зависимости интенсивности отказов системы  $\lambda_c(t)$  от времени эксплуатации системы [1], представленном на рисунке 1.

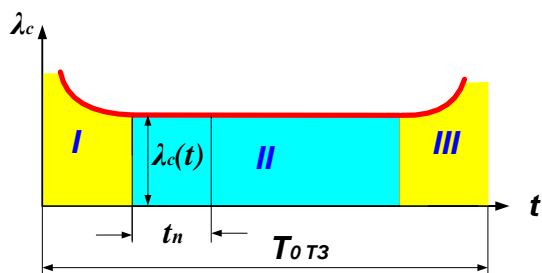


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации ИПК

где:

I – участок начала эксплуатации ИПК;

II – участок, характеризующий время эксплуатации ИПК с параметрами надежности, определяемыми техническим заданием на разработку входящих в него подсистем;

III – участок окончания эксплуатации ИПК;

$\lambda_c$  – интенсивность отказов ИПК;

$t_n$  – время проведения поисковых мероприятий;

$T_0 T_3$  – назначенная наработка на отказ в соответствие с техническим заданием на разработку подсистем ИПК.

На графике № 1, построенном по формуле (2), выбирается участок II.

Таким образом, вводимые упрощения приведут к тому, что интенсивность отказов  $\lambda_c$  ИПК при ее

$$\lambda_c(t) = \frac{a(t)}{P_c(t)} = \frac{\frac{m(t)}{N \cdot t_n}}{\frac{[N - m(t)] \cdot t_n}{N \cdot t_n}} = \frac{m}{(N - m) \cdot t_n} = \frac{1}{(4 - 1) \cdot 72} = 4,63 \cdot 10^{-3} \left( \frac{1}{\text{час}} \right)$$

Здесь:

$m = 1$ ;  $t_n = 72$  часа;  $N = 4$ .

эксплуатации можно считать величиной постоянной, то есть:

$$\lambda_c(t) = \lambda_c = const$$

Тогда, количественные характеристики надежности представляются в следующем виде:

а) вероятность безотказной работы:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c \cdot t} \quad (4)$$

б) наработка на отказ:

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_c \cdot t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda_c} \quad (5)$$

С учетом формулы (3) вероятность безотказной работы можно записать в виде:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c \cdot t} = e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (6)$$

Таким образом, для периода нормальной эксплуатации ИПК, характеризующегося  $\lambda_c(t) = \lambda_c = const$ , справедлив экспоненциальный закон надежности.

В соответствии с приведенным математическим аппаратом, производится расчет показателей надежности ИПК. Допустим, что при проведении поисковых мероприятий вышла из строя одна из подсистем ИПК. Расчет  $\lambda$  по формуле (2) даст следующий результат:

Нарработка на отказ составит:

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_c \cdot t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{4,63 \cdot 10^{-3}} = 215,983 \approx 216 \text{ (час.)}$$

Таблица 1

Вероятность безотказной работы

График вероятности безотказной работы  $P_c(t)$  представлен на рисунке 2.

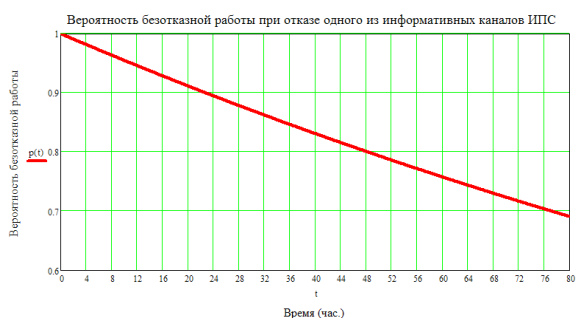


Рис. 2. Вероятность безотказной работы при отказе одного информативного канала ИПС

В зависимости от времени проведения поиска значения вероятности безотказной работы интегрированной поисковой системы при выходе из строя одного из ее информативных каналов, приведенные в таблице № 1, составят:

| Время поиска (часы) $t_n$ | Количество подсистем ИПС $m = 1$        |
|---------------------------|---|
|                           | Вероятность безотказной работы $P_c(t)$ |
| 12                        | 0,946                                   |
| 16                        | 0,929                                   |
| 18                        | 0,920                                   |
| 24                        | 0,895                                   |
| 48                        | 0,801                                   |
| 72                        | 0,717                                   |

Предположим теперь, что при проведении поисковых мероприятий вышли из строя две из четырех подсистем ИПК. Вычисления количественных характеристик надежности принесут следующие результаты:

а) интенсивность отказов  $\lambda_c(t)$  :

$$\lambda_c(t) = \frac{a(t)}{P_c(t)} = \frac{\frac{m(t)}{N \cdot t_n}}{\frac{[N - m(t)] \cdot t_n}{N \cdot t_n}} = \frac{m}{(N - m) \cdot t_n} = \frac{2}{(4 - 2) \cdot 72} = 14 \cdot 10^{-3} \left( \frac{1}{\text{час}} \right)$$

б) наработка на отказ будет равна:

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_c \cdot t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{14 \cdot 10^{-3}} = 71,429 \approx 0,071 \cdot 10^3 \text{ (час.)}$$

в) график вероятности безотказной работы  $P_c(t)$

представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Вероятность безотказной работы при отказе двух каналов ИПС

В зависимости от времени проведения поиска значения вероятности безотказной работы ИПК при выходе из строя одной из ее подсистем, приведенные в таблице № 2, составят:

Таблица 2

Вероятность безотказной работы

| Время поиска (часы) $t_n$ | Количество подсистем ИПК $m = 2$        |
|---------------------------|---|
|                           | Вероятность безотказной работы $P_c(t)$ |
| 12                        | 0,845                                   |
| 16                        | 0,799                                   |
| 18                        | 0,777                                   |
| 24                        | 0,715                                   |
| 48                        | 0,511                                   |
| 72                        | 0,365                                   |

Выполненные расчеты показывают, что при поиске объектов с помощью ИПК в районе площадью  $S = 1$  миль<sup>2</sup> за 16 часов вероятность обнаружения составляет  $P_{обн.} = 0,999$ . Расчеты обосновывают, что вероятность безотказной работы при этом составляет  $P_c(t) \approx 0,8$ . Аппаратура с такой высокой надежностью не требует большого резерва запасной техники [11].

**Заключение**

Таким образом, путь по комплексному использованию ИПК, функционирующих на базе информационно-измерительных и управляющих систем, на РТК является не только надежным и эффективным, но и обеспечивает обоснованную экономию государственных средств при составлении резерва комплекующих запасного имущества и приборов (ЗИП).

**Литература**

1. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов / А. К. Быкадоров, Л. И. Кульбак, В. Ю. Лавриненко и др. Москва: Высш. школа, 1968. - 319 с.
2. Владимирович Г. И., Воронин А. А., Маслов А. Я. Теория надежности радиоэлектронных устройств. М-во обороны СССР. - Москва, 1974. - 272 с.
3. Мартынов, В. Л. Методика практического расчета телевизионных коммуникаций подводных аппаратов / В. Л. Мартынов, Ю. Л. Сиек, А. Н. Борисов // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-3(52). – С. 117-123. – DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.042.
4. Совершенствования телекоммуникаций в гидросфере на базе волоконно-оптических технологий / В. Л. Мартынов, В. И. Дорошенко, Н. М. Божук [и др.] // Информатизация и связь. – 2022. – № 1. – С. 61-67. – DOI 10.34219/2078-8320-2022-13-1-61-67.
5. Исследование эффективности подводных телекоммуникационных систем робототехнических комплексов по критерию ослабления интенсивности лазерного излучения / В. Л. Мартынов, И. Л. Скрипник, Ю. Г. Ксенофонов [и др.] // Информатизация и связь. – 2021. – № 2. – С. 139-145. – DOI 10.34219/2078-8320-2021-12-2-139-145.
6. Бондарева Ж.Ю., Кравчук Д.А. Применение широкополосных сигналов в гидроакустических системах связи в мультиагентных системах мониторинга морского шельфа // Известия ЮФУ Технические науки. 2013. № 9(146). С. 256-258.
7. Голосной А.С. Экспериментальное определение предельной дальности видения подводной лазерной системы // Омский научный вестник. 2020. № 3(171). С. 115-120. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-115-120
8. Богатырев, В. А. Информационные системы и технологии. Теория надежности : Учебное пособие / В. А. Богатырев. – 1-е изд.. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 318 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-00475-5.

9. Основы теории надежности электронных средств: учебное пособие / Н.К. Юрков [и др.]. - Пенза: Изд-во ЛГУ, 2012. - 100 с.
10. Груничев А.С., Кузнецов В. А., Шипов Е.В. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность. Москва: Сов. радио, 1969. - 288 с.
11. Марченко Б. И. Обеспечение надёжности технических средств. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2016. - 88 с.

#### References

1. Osnovy ekspluatatsii radioelektronnoy apparatury: Ucheb. posobie dlya radiotekhn. spetsial'nostey vuzov. [Fundamentals of Operation of Radioelectronic Equipment: Textbook for Radio Engineering Specialties of Higher Education Institutions] A. K. Bykadorov, L. I. Kul'bak, V. Yu. Lavrinenko i dr. Moskva: Vyssh. shkola. 1968. 319 s.
2. Vladimirovich G. I., Voronin A. A., Maslov A. Ya. Teoriya nadezhnosti radioelektronnykh ustroystv [Reliability theory of radioelectronic devices]. M-vo oborony SSSR. Moskva. 1974. 272 s.
3. Martynov, V. L. Metodika prakticheskogo rascheta televizionnykh kommunikatsiy podvodnykh apparatov [Method for practical calculation of underwater vehicle's television communications]. V. L. Martynov, Yu. L. Siek, A. N. Borisov. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 2-3(52). S. 117-123. DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.042.
4. Sovershenstvovaniya telekommunikatsiy v gidrosfere na baze volokonno-opticheskikh tekhnologiy [Improving telecommunications in the hydrosphere based on fiber-optic technology]. V. L. Martynov, V. I. Doroshenko, N. M. Bozhuk [i dr.]. Informatizatsiya i svyaz'. 2022. № 1. S. 61-67. DOI 10.34219/2078-8320-2022-13-1-61-67.
5. Issledovanie effektivnosti podvodnykh telekommunikatsionnykh sistem robototekhnicheskikh kompleksov po kriteriyu oslableniya intensivnosti lazernogo izlucheniya [Study of the efficiency of underwater telecommunication systems of robotic complexes according to the criterion of attenuation of laser radiation intensity]. V. L. Martynov, I. L. Skripnik, Yu. G. Ksenofontov [i dr.]. Informatizatsiya i svyaz'. 2021. № 2. S. 139-145. DOI 10.34219/2078-8320-2021-12-2-139-145.
6. Bondareva Zh.Yu., Kravchuk D.A. Primenenie shirokopolosnykh signalov v gidroakusticheskikh sistemakh svyazi v mul'tiagentnykh sistemakh monitoringa morskogo shel'fa [Application of broadband signals in hydroacoustic communication systems in multi-agent systems of sea shelf monitoring]. Izvestiya YuFU Tekhnicheskie nauki. 2013. № 9(146). S. 256-258.
7. Golosnoy A.S. Eksperimental'noe opredelenie predel'noy dal'nosti videniya podvodnoy lazernoy sistemy [Experimental determination of the limit range of vision of an underwater laser system]. Omskiy nauchnyy vestnik. 2020. № 3(171). S. 115-120. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-115-120
8. Bogatyrev, V. A. Informatsionnye sistemy i tekhnologii. Teoriya nadezhnosti : Uchebnoe posobie [Information systems and technologies. Reliability Theory: Handbook]. V. A. Bogatyrev. 1-e izd. Moskva : Izdatel'stvo Yurayt. 2020. 318 s. (Vysshee obrazovanie). ISBN 978-5-534-00475-5.
9. Osnovy teorii nadezhnosti elektronnykh sredstv: uchebnoe posobie [Fundamentals of Electronic Reliability Theory: Handbook]. N.K. Yurkov [i dr.]. Penza: Izd-vo LGU. 2012. 100 s.
10. Grunichev A.S., Kuznetsov V. A., Shipov E.V. Ispytaniya radioelektronnoy apparatury na nadezhnost' [Reliability testing of radioelectronic equipment]. Moskva: Sov. radio, 1969. 288 s.
11. Marchenko B. I. Obespechenie nadezhnosti tekhnicheskikh sredstv [Ensuring the reliability of technical means]. Sankt-Peterburg: Nestor-Istoriya. 2016. 88 s.

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

**Виктор Леонидович Мартынов**, доктор технических наук, профессор кафедры Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

**Юрий Леонардович Сиек**, доктор технических наук, доцент, декан факультета морского приборостроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: siek@mail.ru

**Сергей Юрьевич Сакович**, кандидат технических наук, доцент кафедры Систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: sergeysakovich@mail.ru

**Viktor L. Martynov**, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Radio Communication in the Navy, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

**Yuriy L. Siek**, Dr. Sci. (Eng), Dean of the Faculty of Marine Instrumentation, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: siek@mail.ru

**Sergej Ju. Sakovich**, Ph.D. (Eng), Docent of the Department of Automatic Control Systems and Onboard Computer Facilities, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: sergeysakovich@mail.ru

**Александр Николаевич Борисов**, старший преподаватель кафедры Систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: bor\_fond93@mail.ru

**Aleksandr N. Borisov**, Senior Lecturer of the Department of Automatic Control Systems and Onboard Computer Facilities, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: bor\_fond93@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2022.

Научная статья

УДК 621.371

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.014>

## Оптимизация информационно-измерительных и управляющих систем подводных аппаратов для повышения эффективности подводного поиска

В.Л. Мартынов<sup>1,2</sup> martynovvoenmeh@mail.ru, Ю.Л. Сиек<sup>1</sup> siek@mail.ru, А.Н. Борисов<sup>1</sup>, bor\_fond93@mail.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, <sup>2</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

**Аннотация** Эффективное применение подводных аппаратов для поиска, обнаружения и идентификации объектов зависит от многих факторов. К основным среди них можно отнести силовые модули, энергетика которых обеспечивает как задаваемое время поисковых мероприятий, так и работу бортовых систем и механизмов, гидроакустические системы, выполняющие функцию первичного обнаружения, а также бортовые системы технического зрения, дающие возможность обеспечить визуальный контакт с объектами поиска. В работе проведён анализ проблем, связанных с выбором силовых модулей, в результате чего обосновано практическое время проведения поисковых мероприятий подводными аппаратами. С учётом временных ограничений предложены пути модернизации гидроакустических систем на базе формирования узконаправленной характеристики направленности, изложены пути такой модернизации. Предлагаемое техническое решение обеспечит реализацию способа определения трех пространственных координат объекта наблюдения, что может быть использовано для точного ориентирования на него телекамеры бортовой системы технического зрения для визуализации объекта наблюдения, то есть его идентификации. Актуальность рассмотренных в статье вопросов оптимизации гидроакустических систем подводных аппаратов не вызывает сомнений, так как их реализация обеспечит повышение эффективности проведения подводного поиска по сравнению с существующими образцами подводной робототехники.

**Ключевые слова:** подводный аппарат, подводный поиск, гидролокаторы бокового обзора, классификация объектов, информационно-измерительные и управляющие системы.

**Для цитирования** Мартынов В.Л., Сиек Ю.Л., Борисов А.Н. и др. Оптимизация информационно-измерительных и управляющих систем подводных аппаратов для повышения эффективности подводного поиска, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 109—116.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.014>

## Optimization of underwater vehicles information-measuring and control systems to improve the efficiency of underwater search

Viktor L. Martynov<sup>1,2</sup> martynovvoenmeh@mail.ru, Yuriy L. Siek<sup>1</sup> siek@mail.ru,

Aleksandr N. Borisov<sup>1</sup> bor\_fond93@mail.ru

<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, <sup>2</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The effective use of underwater vehicles for search, detection and identification of objects depends on multiple factors. The main among them can include power modules, the energy of which provides both the set time of search activities, and the operation of on-board systems and mechanisms, hydroacoustic systems that perform the function of primary detection, as well as on-board vision systems, making it possible to provide visual contact with the objects of search. In work the analysis of the problems connected with a choice of power modules is spent, as a result it is proved practical time of carrying out of search actions by underwater vehicles. Taking into account the time constraints, the ways of modernization of hydroacoustic systems on the basis of formation of narrow directional characteristic are proposed, the ways of such modernization are proposed. The proposed technical solution will provide implementation of method of determination of three spatial coordinates of observation object, which can be used for precise orientation of on-board vision system telecamera to it for visualization of observation object, i.e. its identification. The relevance of the issues of optimization of hydroacoustic systems of underwater vehicles considered in the article does not cause doubts, since their implementation will provide an increase in the efficiency of underwater search in comparison with the existing examples of underwater robotics.

**Key words:** underwater vehicle, underwater search, side-scan sonar, object classification, information-measuring and control systems.

**For citation:** Viktor L. Martynov, Yuriy L. Siek, Aleksandr N. Borisov Optimization of underwater vehicles information-measuring and control systems to improve the efficiency of underwater search. 2022. № 4 part 2. P. 109—116.

### Введение

Мероприятия, связанные с эффективностью проведения подводного поиска, будут для подводной робототехники актуальными всегда. Её уникальность

заключается в том, что именно с помощью подводных аппаратов решается вопрос успешного освоения ресурсов Мирового океана в совокупности с выполнением специальных задач. При этом оптимизация информационно-измерительных и

управляющих систем, средств гидроакустики, навигации и технического зрения робототехнических комплексов обеспечит выбор оптимальных алгоритмов поисковых мероприятий, что уменьшит их зависимость от бортовых силовых модулей.

### Особенности создания силовых модулей АНПА

Практика показывает, что конструкторы при проектировании автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) отдают предпочтение химическим источникам тока (ХИТ) – аккумуляторам, технические параметры которых автоматически контролируются с помощью информационно-измерительных и управляющих систем.

Более 95% подводных аппаратов имеют аккумуляторные батареи [1]. Как правило, в АБ применяются следующие аккумуляторы:

- свинцово – кислотные;
- щелочные;
- литиевые.

Свинцово – кислотные аккумуляторы отличаются надёжностью в работе, простотой обслуживания, небольшой стоимостью. К недостаткам следует отнести большую массу и нарушение работы при больших углах наклона.

Щелочные аккумуляторы (серебряно – цинковые, никель – кадмиевые, никель - железные) применяют реже ввиду ограниченной энергоёмкости. Они способны разряжаться до 45...50% номинальной ёмкости. Однако, серебряно – цинковые аккумуляторы не отличаются высокой надёжностью, кроме того, они дороги [7].

Литиевые аккумуляторы отличаются:

- абсолютной герметичностью;
- работоспособностью в любом пространственном положении;
- обеспечением вибро- и ударопрочности.

Среди главных преимуществ литий-полимерных аккумуляторов можно выделить:

- высокую плотность энергии;
- низкий саморазряд;
- длительный срок службы;
- высокое номинальное напряжение;
- большое количество циклов заряда-разряда (до 1000 циклов);
- низкая стоимость эксплуатационных расходов (обслуживания).

Однако, имеют место существенные сложности, вызванные проблемами технологий для производства аккумуляторных батарей класса литиевых в РФ:

1) отечественные разработчики и производители литий-ионных батарей вынуждены использовать импортные активные материалы, поскольку отечественные производства большинства материалов либо отсутствуют, либо не обеспечивают необходимого качества в силу отсутствия современного оборудования и качественного сырья. По данным АО «Уралэлемент», при разработке и изготовлении ХИТ применяются следующие материалы и комплектующие изделия иностранного производства [2]:

- литированный оксид кобальта – КНР;
- графит – КНР, Швейцария;
- чёрный углерод Super P-Li – Бельгия;
- поливинилиденфторид PVDF – КНР, Франция;
- N – метилпирролидон – Германия;

- фольга алюминиевая – КНР;
- клеммные колодки типа DG25 для монтажа – Германия.

Указанные позиции наша страна вынуждена приобретать за рубежом из-за низкого качества и дороговизны отечественной продукции.

2) отсутствуют отечественные аналоги литий-ионных аккумуляторов, из-за чего производители вынуждены приобретать за рубежом следующие комплектующие:

- токовыводы алюминиевый и никелевый – в КНР;
- фольгу медную – в КНР;
- сепараторы – в КНР или США;
- электролит – в КНР;
- алюминиевая полимерная многослойная плёнка – в КНР;
- микросхемы типа LTC6802 ... LTC6804 – в США;
- микросхемы типа ADUM2483; ADUM5000; ADUM5401 – в США.

3) сдерживается совершенствование характеристик аккумуляторных батарей, так как:

- практически полностью отсутствует производство исходных ингредиентов. Анодный материал и феррофосфат лития уступают по качеству зарубежным материалам;
- отсутствует производство электролита, для которого ряд компонентов в России не создаётся.

Кроме того, для реализации задач импортозамещения и повышения технологической независимости в части литий-теонилхлоридных батарей необходимо восстановить на территории РФ производство хлористого тионила (прекращено в 90-х годах прошлого столетия) и алюминия хлористого безводного (в 2015 году производство было закрыто). Необходимо, также, наладить добычу сырья и производство лития в достаточном объёме.

4) невысокая удельная мощность батарей класса литиевых, составляющая немногим более 100 Вт/кг.

Тем не менее, несмотря на указанные ограничения, при выборе силовых модулей для РТК ВН, разработчики АНПА отдают предпочтение именно литиевым аккумуляторным батареям по причинам, изложенным выше.

Сказанное убедительно доказывает необходимость скорейшего решения вопроса о внедрении бортовых энергетических систем, работа которых основана на совершенно иных принципах по сравнению с рассмотренными выше. Работа и техническое состояние этих изделий должны автоматически диагностироваться с помощью бортовых информационно-измерительных и управляющих систем.

С учётом изложенных ограниченных возможностей силового модуля максимальное рабочее время АНПА не превышает нескольких десятков часов. За это время требуется выйти в заданный район, обеспечить проведение поисковых мероприятий, идентифицировать обнаруженный объект и вернуться либо в район базирования, либо на корабль обеспечения.

### Актуальность оптимизации поисковых средств АНПА

Анализируя физические основы поиска [3...7], включающие рассмотрение среды его проведения, объектов, а также средств обнаружения, можно отметить, что результат проведения поисковых

операций одних и тех же объектов в одних и тех же водных акваториях для различных АНПА будет зависеть от того, какими средствами обнаружения те оснащены. Наличие определенного состава технических средств, а также обеспечивающих их функционирование информационно-измерительных и управляющих систем, и их оптимизация будут диктовать выработку эффективной последовательности действий, составляющих алгоритм поиска, что является актуальным в условиях определенных ограничений АНПА, перечисленных выше.

Создание таких алгоритмов применительно к задаче повышения поискового потенциала подводной робототехники даст возможность определить направление научного исследования, обеспечивающего формирование на АНПА оптимальной системы подводного поиска.

Существующий в настоящее время алгоритм поиска подводных объектов научно-исследовательскими подводными аппаратами не является оптимальным. Расположенная в носовой части АНПА телевизионная камера (ТВК) обеспечивает визуальный просмотр небольшой части пространства впереди по курсу. Сложность в использовании систем технического зрения АНПА заключается в том, что на параллельных галсах зоны визуального просмотра должны пересекаться, чтобы не допустить пропуска объектов поиска. Эти зоны обзора приведены на рисунке 1 [3]. При этом, ориентированные по бортам гидролокаторы бокового обзора (ГБО) даже с поддержкой их работы информационно-измерительными и управляющими системами, не позволяют достоверно классифицировать акустический контакт с обнаруженными объектами.

Существующий состав поисковых технических средств дает возможность применить такой алгоритм, который априори не может быть эффективным. Причина - возможный пропуск объектов поиска. Это следует из того, что объект, находящийся на траверзах (по бортам) АНПА, необходимо обнаружить гидролокатором бокового обзора и классифицировать.

В соответствии с положениями теории обнаружения объектов необходимым условием его обнаружения является либо наличие у объекта собственных физических полей, отличных по своему характеру от аналогичных полей окружающей среды, либо способность объекта особым образом деформировать внешние по отношению к нему поля. Окружающая среда также способна деформировать в той или иной степени любое из физических полей. Очевидно, что объект может быть обнаружен в воде лишь в том случае, если он деформирует внешние или излучает собственные поля иначе, чем водная среда, то есть если он является локальной неоднородностью среды.

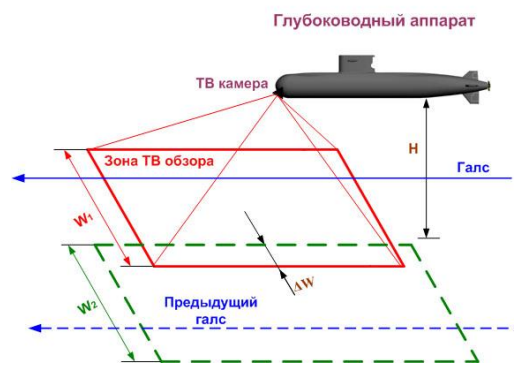


Рис. 1. Зоны обзора пространства системами технического зрения АНПА

Локальные неоднородности могут быть естественными неоднородностями среды и искусственными, созданными человеком – объектами поиска. Эти принципиально различные по природе неоднородности могут обладать сходными физическими параметрами. Данное обстоятельство усложняет поиск рукотворных объектов, являющихся объектами поиска, в присутствии естественных неоднородностей, которые следует рассматривать как тела-помехи.

Наряду с полезной информацией, содержащей сведения об объектах поиска и являющейся сигналом, на акустические антенны ГБО поступает также информация, не содержащая данных сведений и представляющая собой помеху. Таким образом, на входе ГБО образуется «смесь» сигнала и помехи. Помехами являются флуктуации естественных полей, деформации этих полей, вызванные телами-помехами, шумы, возникающие в водной среде и аппаратуре, помехи от непосредственного воздействия на антенны ГБО излучаемого ГБО акустического поля, его флуктуаций и отражений от дна и придонных слоев воды. Этот вид помех в импульсных системах обнаружения, таких, как ГБО, имеет нестационарный (спадающий по времени) характер. Обнаружение акустического сигнала при мешающем воздействии нестационарных помех затруднительно.

После принятия решения об обнаружении сигнала осуществляется операция первичного опознавания (или классификации) объекта средствами гидроакустики. Качество выполнения этой операции зависит от силы сигнала и количества используемых для этого характерных его признаков [2].

Статистические признаки, характеризующие объект, непостоянны, зависят от его типа и расположения, от режимов работы ГБО и имеют распределения, аналогичные распределениям на рисунке 2. Помехой в операции опознавания или классификации является сигнал от тела-помехи, признаки которого имеют распределения, подобные распределениям аналогичных признаков сигнала от объекта.

Решение в операции опознавания принимается по каждому признаку в отдельности, и на основании этих частных решений утверждается окончательное решение об опознавании объекта. Иными словами, принимается решение о том, что в зоне обнаружения системы подводного поиска (СПП) имеется локальная неоднородность и эта неоднородность является определенным типом объекта поиска.

Вторичное опознавание осуществляется средствами подводного телевидения АНПА, управление работой которых осуществляется информационно-измерительными и управляющими системами. Для этого АНПА должен изменить курс, приблизиться к цели на расстояние, определяемое возможностями видения бортовых телевизионных средств, рассмотреть ее визуально и, в случае несоответствия цели объекту, вернуться обратно.

Приведенный алгоритм представлен на рисунке 2 [3]:

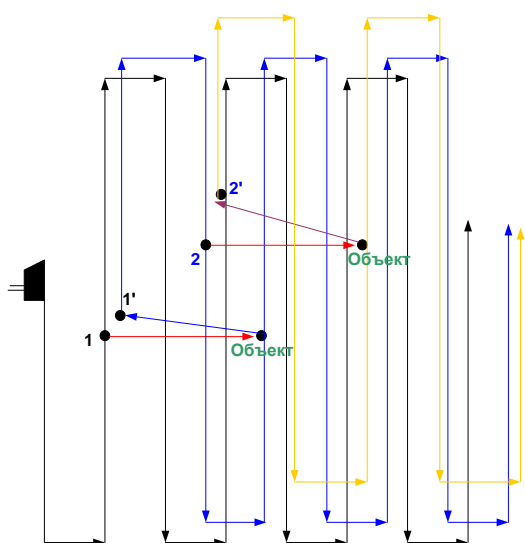


Рис. 2. Алгоритм поиска, реализованный в схеме маневрирования АНПА

Здесь черным цветом показан заданный курс маневрирования, а синим и желтым цветом – курсы, смещенные относительно заданного вследствие ошибок навигационного счисления. Такая точность маневрирования обеспечивается системой управления движением АНПА, функционирование которой реализуется с использованием информационно-измерительных и управляющих систем. Точками «1» и «2» обозначены позиции АНПА в момент начала маневра сближения с объектом для его визуального осмотра. Точками «1'» и «2'» обозначены позиции АНПА при возвращении в исходное место до начала маневра сближения. Как следует из рисунка 2, расстояния «1...1'» и «2...2'» характеризуют ошибки навигационного счисления места АНПА, наличие которых может привести к пропуску одиночных объектов.

Необходимость сближения АНПА с объектами поиска вызвана низкой информативной возможностью ГБО, что подтверждается рисунке 3 [4].

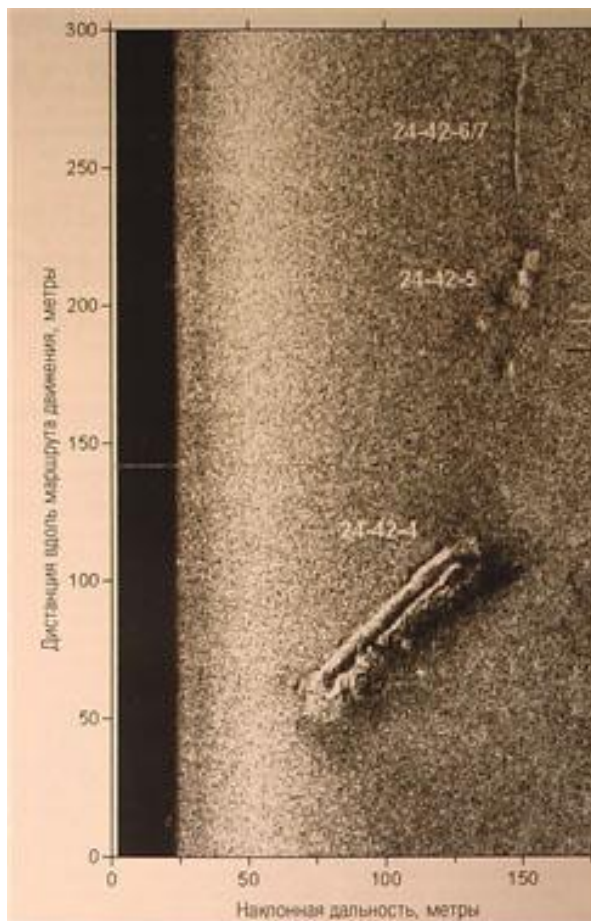


Рис. 3. Изображение на мониторах объектов, обнаруженных гидролокатором бокового обзора

При реализации рассмотренного алгоритма поиска (рис. 2) вопрос повышения поисковой производительности АНПА строится лишь на применении различных вариантов его маневрирования, где решающая роль отводится точности навигационной прокладки курса. Однако указанный путь не является оптимальным из-за больших погрешностей в определении места корабля. Анализ схемы маневрирования АНПА параллельными галсами (курсами) - рисунок 4 [5] - показывает большие погрешности выполнения этой задачи.

Схема представлена с учетом того, что положение АНПА определялось с высокой точностью на поверхности воды по данным GPS/ГЛОНАСС.

Сказанное приводит к большому затрату времени, сокращения которого можно добиться за счёт технологий, которые связаны с определением пространственных координат объектов поиска гидролокаторами АНПА.

#### Оптимизация гидроакустических систем.

Известен способ измерения двух координат объекта гидролокатором бокового обзора (ГБО) подводного аппарата или надводного корабля Гидролокатор бокового обзора. Известный способ дает возможность позиционировать объект наблюдения на плоскости в координатах:

- дальность;
- курсовой угол (азимут).

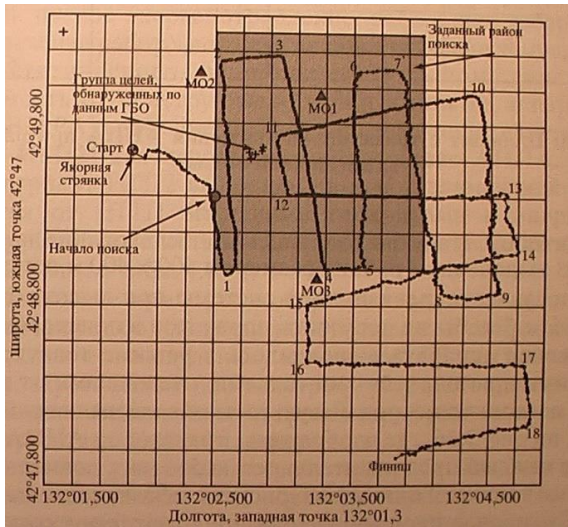


Рис. 4. Схема маневрирования АНПА в режиме придонного плавания

В известном способе измерение дальности осуществляется локацией (излучением) зондирующих импульсов гидролокатором бокового обзора по бортам судна. Импульсы в виде звуковой (низкочастотной) энергии, дискретной по времени, излучаются акустической линейной антенной решеткой, отражаются от объекта и отраженным эхо-сигналом воспринимается этой же антенной.

Измерение азимута (A) объекта в известном способе осуществляется выбором направления излучения зондирующих импульсов по горизонту вертикально ориентированной диаграммой направленности, то есть реализацией электронного сканирования - рисунок 5 [6]:

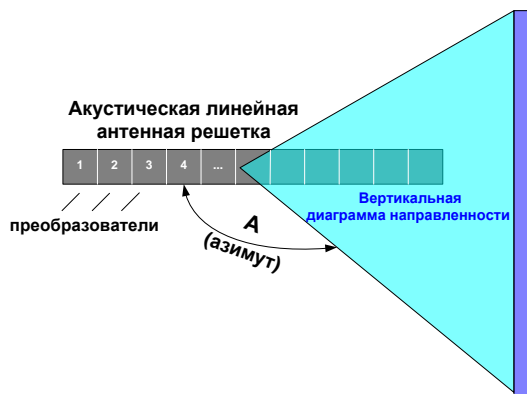


Рис. 5. Измерение азимута объекта гидролокатором бокового обзора

Это обеспечивается введением временной задержки момента начала излучения акустической энергии каждым последующим преобразователем стационарной акустической линейной антенной решетки относительно первого преобразователя - рисунок 5 [7].

Процесс совместного измерения дальности D и азимута A объекта гидролокатором бокового обзора представлен на рисунке 6 [8].

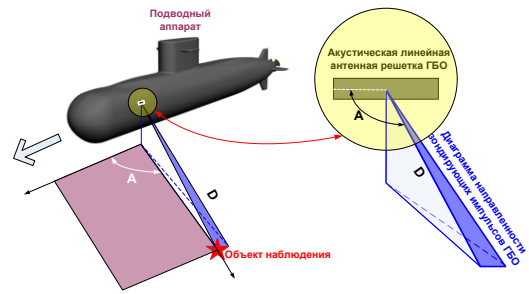


Рис. 6. Измерение дальности D и азимута A

Недостатком известного способа является потеря информативности. Объекты, обнаруженные ГБО в пространстве (во взвешенном состоянии), определяются как объекты, расположенные на грунте.

Известен способ измерения трех координат объекта. Он основан на излучении зондирующего импульса акустической антенной в широком секторе по азимуту и углу места, с последующим приемом эхо-сигналов веером статических диаграмм направленности. Каждая диаграмма направленности статического веера осуществляет прием эхо-сигнала по заданному ей направлению без сканирования в пространстве.

Недостатками указанного известного способа измерения трех координат объекта являются:

- низкая точность, связанная с возможностью пропуска объекта поиска из-за дискретности зоны просмотра;
- малая дальность действия, вызванная низкой плотностью мощности эхо-сигнала;
- сложность реализации алгоритмов обработки эхо-сигналов.

Техническим результатом предлагаемого способа измерения координат объекта гидролокатором бокового обзора является точное определение трех его координат, что дает возможность достоверно позиционировать объект в пространстве.

Это достигается тем, что способ измерения трех пространственных координат объекта в водной среде гидролокатором бокового обзора основан на взаимодействии двух взаимно пересекающихся диаграмм направленности (ДН). Их пересечение обеспечивает перемножение эхо-сигналов, получаемых каждой диаграммой направленности, в результате чего образуется так называемая «игольчатая» ДН.

Каждая из двух взаимодействующих диаграмм направленности образована своей акустической линейной антенной решеткой, при этом указанные антенные решетки располагаются ортогонально друг относительно друга.

Способ измерения координат объекта гидролокатором бокового обзора отличается от известного тем, что по предлагаемому способу объект наблюдения просматривается каждой из двух сканирующих диаграмм направленности и находится в зоне действия «игольчатой» ДН, осуществляющей его позиционирование в пространстве с определением трех пространственных координат:

- дальности;
- курсового угла (азимута);
- угла места.

Представленный чертеж поясняет суть предлагаемого технического решения. На рисунке 7 [9] изображена физическая модель акустической антенны, с помощью которой реализуется предлагаемый способ измерения координат объекта гидролокатором бокового обзора:

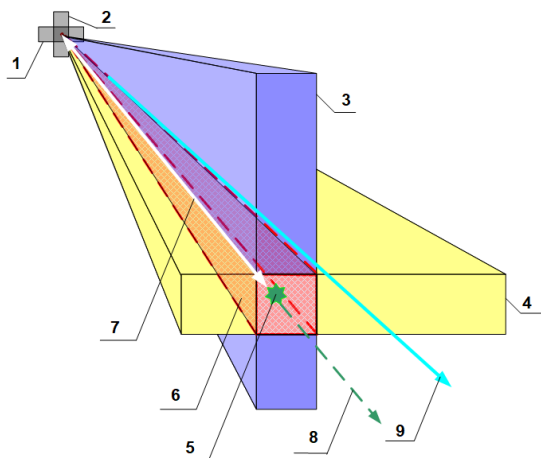


Рис. 7. Физическая модель акустической системы для измерения координат объекта гидролокатором бокового обзора

Акустическая антенна содержит две совмещенные акустические линейные антенные решетки 1 и 2. Обе антенные решетки расположены друг относительно друга под углом 90°, образуют жесткую конструкцию и формируют две отдельные ортогонально расположенные плоские диаграммы направленности: вертикальную 3 и горизонтальную 4. Вертикально расположенная диаграмма направленности 3 образована горизонтальной акустической линейной антенной решеткой 1 и сканирует в горизонтальной плоскости, а горизонтально расположенная диаграмма направленности 4 образована вертикальной акустической линейной антенной решеткой 2 и сканирует в вертикальной плоскости.

Перед сканированием диаграмм направленности в пространстве происходит облучение акустической энергией объекта наблюдения 5.

Предлагаемый способ реализуется следующим образом.

Сначала в водную среду излучается зондирующий импульс, после чего акустической антенной принимаются отраженные от объектов эхосигналы.

Излучение акустической энергии в пространство выполняет горизонтальная линейная акустическая антенная решетка 1, диаграмма направленности 3 которой сканирует из крайнего левого положения в крайнее правое.

После этого осуществляется прием отраженных эхосигналов. Для этого две плоские диаграммы направленности 3 и 4 сканируют в водной среде последовательно, друг за другом.

Сначала прием эхосигналов производится диаграммой направленности (ДН) 4, сканирующей из крайнего верхнего положения в крайнее нижнее. После этого ДН 4 стоит, а ДН 3 сканирует из крайнего правого положения в крайнее левое. Далее ДН 3 стоит, а ДН 4 сканирует из крайнего нижнего

положения в крайнее верхнее и так далее - рисунок 8 [10].

Время излучения, время сканирования и время, в течение которого ДН стоит, всегда одинаково.

Взаимное пересечение горизонтальной 4 и вертикальной 3 диаграмм направленности обеспечивает формирование «игольчатой» диаграммы направленности 6, обеспечивающей определение дальности 7 до объекта наблюдения.

Лучи, представляющие собой направление на объект наблюдения 8 и направление геометрической оси 9 двух антенных решеток, обеспечивают позиционирование объекта как по азимуту, так и углу места.

Предлагаемый способ обеспечивает определение трех пространственных координат объекта наблюдения и может быть использовано для точного ориентирования на него телевизионных средств подводного видения при проведении подводного поиска.

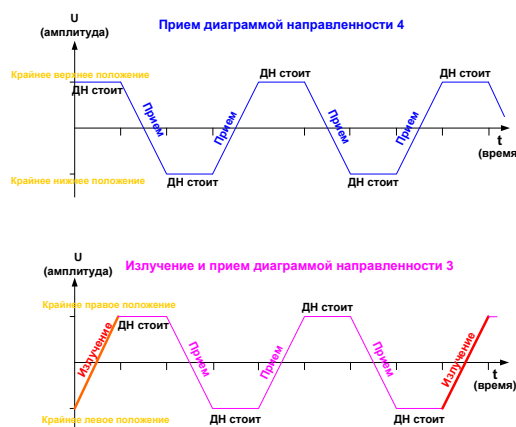


Рис. 8. Сканирование диаграмм направленности ГБО

Математическая постановка задачи оптимизации подводного поиска ПА состоит в снижении времени проведения поисковых мероприятий за счет выбора эффективной ширины полосы обследования  $Ш_{эф}$ .

При движении АНПА прямолинейно и равномерно выражения для  $Ш_{эф}$  при непрерывном обследовании можно представить в следующем виде [3]:

$$Ш_{эф} = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{1}{V_p} \int_{y_1}^{y_2} \gamma \sqrt{x^2 + y^2} dy \right] \right\} dx \quad (1)$$

где  $V_p$  - относительная скорость объекта наблюдения,  $x$  - направление относительно курса объекта поиска в момент времени  $t$ ,  $y$  - направление относительно траверза в момент времени  $t$  при взаимном перемещении АНПА и объекта наблюдения,  $\gamma$  - мгновенная плотность вероятности обнаружения объекта поиска.

Наличие в формуле (1) относительной скорости  $V_p$  является традиционным переходом к относительному движению, когда наблюдатель (АНПА) условно неподвижен, а движение объекта поиска происходит с относительной скоростью  $V_p$  и относительным курсом.

Величины  $x$  и  $y$ , входящие в формулу (1), представлены из следующих соображений. Примем за ось абсцисс  $x$  прямоугольной системы координат направление  $V_p$  объекта поиска, а за ось ординат  $y$  - направление относительного траверза. Введение понятия относительный траверз поясняется рисунком 9:

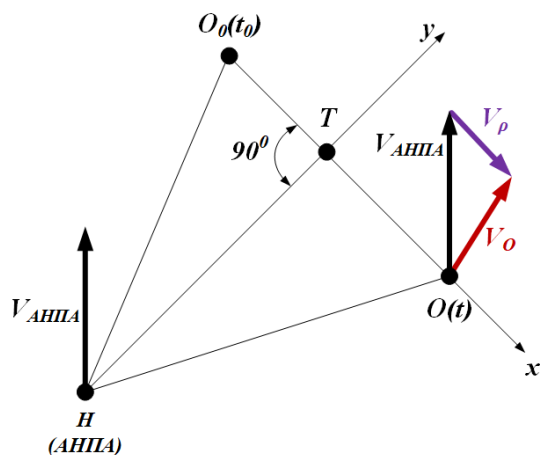


Рис. 9. Относительный траверз

Здесь в точке Н. находится наблюдатель (АНПА). Объект наблюдения обозначен символом  $O$ ,  $V_O$  - его скорость,  $V_{АНПА}$  - скорость АНПА.

Вектор скорости относительного перемещения объекта наблюдения определяется из треугольника скоростей. На рисунке 9 показана линия относительного перемещения объекта поиска с момента его начального обнаружения ( $t_0$ ) до текущего момента времени  $t$ .

Эта линия является линией относительного курса объекта. В точке Т между АНПА и объектом имеется

наименьшее расстояние НТ. Это расстояние называют траверсной дальностью, а точка Т называется относительным траверсом. Направление из точки Н в точку Т представляет собой направление относительного траверза.

На рисунке 9 за ось абсцисс (ось  $x$ ) принято направление относительного курса объекта поиска, а за ось ординат (ось  $y$ ) - направление относительного траверза.

При этом начало координат взято в точке наибольшего сближения в момент относительного траверза (точка Т).

Задаваясь вероятностью обнаружения, выражаем плотность вероятности  $\gamma$  для формулы (1).

Выбор и обоснование метода оптимизации определяется возможностями бортовой системы технического зрения АНПА  $D_{АНПА}$  - и зависит от прозрачности водной среды. Между  $D_{АНПА}$  и  $Ш_{эф}$  существует пропорциональная зависимость.

Использование выбранного метода оптимизации зависит от характера объекта поиска (статичность/динамичность) и планируется исходя из возможностей бортовой энергетики АНПА.

### Заключение

Таким образом, оптимизация гидроакустических систем автономных необитаемых подводных аппаратов, реализованная в гидролокаторах бокового обзора на базе информационно-измерительных и управляющих систем, обеспечит повышение эффективности его проведения. Указанная эффективность линейно связана с увеличением рабочего времени подводных аппаратов за счёт его экономии на классификацию обнаруженных подводных объектов, которая осуществляется системами технического зрения по их точным координатам.

### Литература

1. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов. - Ленинград: «Судостроение», 1978. 237 с.
2. Протокол заседания НТС ВПК РФ № 10 (91) от 04.04.2017 г. на тему: «Научно-технические проблемы создания автономных источников электропитания длительного срока службы».
3. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. - Москва: «Советское радио», 1977. 334 с.
4. Емельянов Л. А. и др. Теория поиска в военном деле. - Москва: «Воениздат», 1964. 208 с.
5. Жуков Р. Ф., Кондратович А. А. и др. Системы, приборы и устройства подводного поиска. - Москва: «Воениздат», 1972. 182 с.
6. Абчук В.А., Матвейчук Ф. А. и др. Введение в теорию выработки решений. - Москва: «Воениздат», 1972. 342 с.
7. Дикарев В.И. и др. Методы и средства обнаружения объектов в укрывающихся средах. - СПб. «Наука и техника». 2004. 280 с.
8. Мартынов В. Л., Дмитриев М. В., Прохоров В. Н. Основы расчёта телевизионных систем подводного видения // Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА - 2020). Изд-во «Политех-пресс». Санкт-Петербург. 2020 г. С. 262–266.
9. Martynov V.L., Golosnoy A.S., Sergeev S.M. Wireless optical communication channel in the hydrosphere as an alternative of communication by cable// Системы управления и информационные технологии, №1 (83), 2021. – С. 63–66, DOI: 10.36622/VSTU. 2921.83.1.01.
10. Мартынов В. Л., Сиек Ю. Л., Борисов А. Н. Методика практического расчёта телевизионных коммуникаций подводных аппаратов // Морские интеллектуальные технологии, № 2, том 3, сквозной номер 52, ISSN № 2588–0233, ISSN № 2073–7173, 2021. – С. 117–123.

## References

1. Dmitriev A. N. Proektirovanie podvodnykh apparatov [Underwater Vehicle Design]. Leningrad: «Sudostroenie», 1978. 237 s.
2. Protokol zasedaniya NTS VPK RF № 10 (91) ot 04.04.2017 g. na temu: «Nauchno-tekhnicheskie problemy sozdaniya avtonomnykh istochnikov elektropitaniya dlitel'nogo sroka sluzhby» [Scientific and technical problems of creating autonomous long-life power sources].
3. Abchuk V.A., Suzdal' V.G. Poisk ob"ektov [Search for objects]. Moskva: Sov. radio, 1977. 334 s.
4. Emel'yanov L.A. i dr. Teoriya poiska v voennom dele [The theory of search in military affairs]. Moskva: Voenizdat, 1964. 208 s.
5. Zhukov R.F., Kondratovich A.A. i dr. Sistemy, pribory i ustroystva podvodnogo poiska [Underwater search systems, instruments and devices]. Moskva: Voenizdat, 1972. 182 s.
6. Abchuk V.A., Matveychuk F.A. i dr. Vvedenie v teoriyu vyrabotki resheniy [Introduction to the theory of decision making]. Moskva: Voenizdat, 1972. 342 s.
7. Dikarev V.I. i dr. Metody i sredstva obnaruzheniya ob"ektov v ukryvayushchikhsya sredakh [Methods and means of detecting objects in hiding environments]. SPb. Nauka i tekhnika. 2004. 280 s.
8. Martynov V. L., Dmitriev M. V., Prokhorov V. N. Osnovy rascheta televizionnykh sistem podvodnogo videniya [Fundamentals of calculation of underwater vision television systems] // Trudy Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki» (GA - 2020). Izd-vo «Politekhn-press». Sankt-Peterburg. 2020 g. S. 262-266.
9. Martynov V.L., Golosnoy A.S., Sergeev S.M. *Wireless optical communication channel in the hydrosphere as an alternative of communication by cable*. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. №1 (83). 2021. S. 63-66, DOI: 10.36622/VSTU. 2921.83.1.01.
10. Martynov V. L., Siek Yu. L., Borisov A. N. Metodika prakticheskogo rascheta televizionnykh kommunikatsiy podvodnykh apparatov [Method for practical calculation of underwater vehicle's television communications] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 2, tom 3, skvoznoy nomer 52, ISSN № 2588-0233, ISSN № 2073-7173, 2021. S. 117-123.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Виктор Леонидович Мартынов**, доктор технических наук, профессор кафедры Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

**Юрий Леонардович Сиек**, доктор технических наук, доцент, декан факультета морского приборостроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: siek@mail.ru

**Александр Николаевич Борисов**, старший преподаватель кафедры Систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: bor\_fond93@mail.ru

**Viktor L. Martynov**, Dr. Sci. (Eng)s, Professor of the Department of Radio Communication in the Navy, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

**Yuriy L. Siek**, Dr. Sci. (Eng)s, Dean of the Faculty of Marine Instrumentation, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: siek@mail.ru

**Aleksandr N. Borisov**, Senior Lecturer of the Department of Automatic Control Systems and Onboard Computer Facilities, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: bor\_fond93@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2022.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

### AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 621.791.3:621.791.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.015>

#### Технологические способы создания неразъёмных соединений разнородных материалов

В.О. Муктепавел<sup>1</sup> voldemarmukt@mail.ru, В.М. Карпов<sup>1</sup> clvr00@gmail.com,  
И.Г. Струков<sup>1</sup> strukov.i@gmail.com

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

**Аннотация.** В статье представлены результаты отработки технологий соединения титанового сплава с пермендюр, что высоко актуально при изготовлении магнитострикционных преобразователей для ультразвуковой ударной обработки сварных соединений. Рассмотрены варианты получения неразъёмных соединений различными способами пайки, сварки и механическим обжимом. Ударным характером работы обоснована предпочтительность изготовления паяных либо сварных магнитострикторов. Приведены режимы для бесфлюсовой пайки в вакууме серебросодержащими припоями, аморфными припоями марки СТЕМЕТ (1202 и 1403) и диффузионной сварки через прослойку медьсодержащей ленты ЛМП-2 (изготовленной прессованием ультрадисперсного порошка). Для приведенных режимов были проведены механические испытания образцов, показавшие, что разрушение происходило по основному металлу – пермендюру. Результаты могут быть использованы для решения данной технологической задачи, а также (при проведении дополнительных исследований) для решения аналогичных проблем получения неразъёмных соединений из разнородных сплавов, которые должны работать в условиях ударных знакопеременных циклических нагрузок.

**Ключевые слова:** пайка, диффузионная сварка, СТЕМЕТ, ПСр, ЛНП-2, ЛМП-2, титан, пермендюр.

**Благодарности:** В работе принимали участие: Е.И. Чулков, Е.Ш. Статников, В.Т. Федотов, А.В. Люшинский и др.  
**Для цитирования:** Муктепавел В.О., Карпов В.М., Струков И.Г. Технологические способы создания неразъёмных соединений разнородных материалов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 117—122.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.015>

#### Technological methods for creating permanent joints of dissimilar materials

Voldemar O. Muktepavel<sup>1</sup> voldemarmukt@mail.ru, Vyacheslav M. Karpov<sup>1</sup> clvr00@gmail.com,  
Ilya G. Strukov<sup>1</sup> strukov.i@gmail.com

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

**Abstract.** The article presents the results of the development of technologies for joining a titanium alloy with a permendyur (49Co49Fe2V), which is highly relevant in the manufacture of magnetostrictive transducers for ultrasonic impact treatment of welded joints. The options for obtaining permanent joints by various methods of soldering, welding and mechanical crimping are considered. The impact nature of the work substantiates the preference for manufacturing brazed or welded magnetostrictors. The modes for flux-free soldering in vacuum with silver-containing solders, amorphous solders of the STEMET brand (1202 and 1403) and diffusion welding through the layer of copper-containing tape LMP-2 (made by pressing ultrafine powder) are given. For the given regimes, mechanical tests of the samples were carried out, which showed that the destruction occurred along the base metal - permendyur. The results can be used to solve this technological problem, as well as (with additional research) to solve similar problems of obtaining permanent joints from dissimilar alloys, which must work under conditions of shock alternating cyclic loads.

**Keywords:** soldering, diffusion welding, STEMET, PSR, LNP-2, LMP-2, titanium, permendyur.

**Acknowledgments:** The following people took part in the work: E.I. Chulkov, E.Sh. Statnikov, V.T. Fedotov, A.V. Lushinsky and others

**For citation:** Voldemar O. Muktepavel, Vyacheslav M. Karpov, Ilya G. Strukov, Technological methods for creating permanent joints of dissimilar materials, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 117—122.

#### Введение

Многие разнородные металлы и сплавы не обладают физической свариваемостью. Однако при проектировании конструкций возникает необходимость создания неразъёмных соединений разнообразных материалов, и при этом соединения

должны выдерживать проектную эксплуатационную нагрузку, часто весьма значительную.

В настоящей работе рассмотрены примеры технологических способов создания неразъёмных стыковых соединений таких разнородных материалов, как титановый сплав марки 3М и железокобальтовый сплав марки 49К2Ф (пермендюр), обладающий высоким магнитострикционным

эффектом. Автор является инициатором и непосредственным участником разработки представленных технологий.

### Объект исследования и постановка задачи

В рабочих инструментах, использующих ультразвуковые колебания мощностью 1 кВт и выше, часто применяются магнитострикционные преобразователи (МСП).

Ультразвуковые магнитострикционные преобразователи являются электромеханическими устройствами. Они преобразуют электрическую энергию в энергию магнитного поля и затем в механическую ультразвуковую энергию, которая используется в различных технических процессах – например при ультразвуковой сварке. Действие МСП основано на магнитоупругом эффекте, т.е. на том, что некоторые материалы (железо, никель, кобальт и специально разработанные магнитострикционные сплавы) деформируются в магнитном поле.

Если магнитоупругий стержень расположить вдоль переменного магнитного поля, то этот стержень станет попеременно сокращаться и удлиниться, т.е. испытывать механические колебания с частотой переменного магнитного поля и амплитудой, пропорциональной его индукции. Этот колебательный процесс может быть использован в ударном инструменте.

Ультразвуковые магнитострикционные преобразователи успешно применяются в инструментах для ультразвуковой ударной обработки (УУО) сварных соединений различных конструкций с целью повышения их усталостной прочности [1].

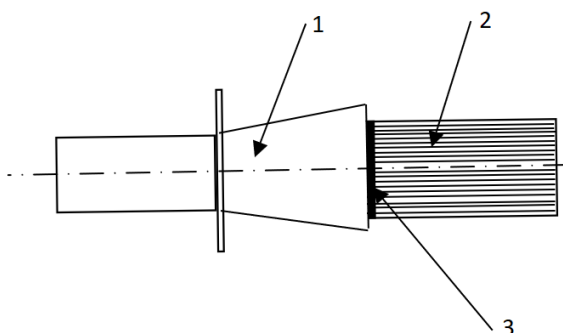


Рис. 1. Конструкция магнитострикционного преобразователя для УУО: 1 – Концентратор; 2 – Пакет пермендюра; 3 – Место соединения.

Магнитострикционный преобразователь состоит из магнитоупругого стержня и концентратора (резонансного преобразователя) (рис.1). В качестве магнитоупругого стержня используется пакет тонких пластин пермендюра.

Пластины пермендюра толщиной 0,2 мм собираются в пакет 20х30мм, обжатый накладными пластинами из титанового сплава. Применяется сплав марки 49К2Ф по ГОСТ 10160-75 (пермендюр), содержащий 49% железа, 49% кобальта и 2% ванадия.

Концентратор же изготавливается из титанового сплава марки 3М, содержащего добавки алюминия, циркония, кремния и железа.

Создание МСП для ультразвукового ударного инструмента, а именно неразъемного соединения

пакета пермендюра с концентратором из титанового сплава, является определенной задачей, осложненной высокой химической активностью титана и его склонностью образовывать интерметаллические соединения при сварке титановых сплавов со сплавами на основе железа.

В процессе отработки технологии создания неразъемного соединения было испытано несколько способов, основные из которых представлены в настоящей работе.

### Испытания технологии бесфлюсовой пайки в высоком вакууме серебросодержащими припоями

Известны технологии пайки титана и его сплавов между собой [2]. Однако создание паяных соединений титана с неродственными металлами вызывает значительные затруднения. В результате проведения исследований и испытаний разработана следующая технология пайки.

Пайка производится в специальной вакуумной печи с общим нагревом преобразователя. В стык между пакетом и титановым концентратором укладывается серебросодержащий ленточный припой ПСрМО 68-27-5 толщиной 0,1мм. Сборка устанавливается в специальное приспособление, обеспечивающее нормированный прижим пакета к концентратору, и помещается в камеру печи (рис.2).



Рис. 2. Две сборки на столике колпаковой камеры печи

В камере создается вакуум  $2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. ( $2,66 \cdot 10^{-2} - 6,65 \cdot 10^{-3}$  Па). Зона пайки нагревается до температуры 840-850°C, производится выдержка при этой температуре 0,5 мин. Скорость нагрева 17°C/мин (время нагрева 50 мин – 1 час).

Охлаждение производится со скоростью 17°C/мин. Снятие вакуума и открывание камеры производится при температуре не выше 150°C. Выемка из печи спаянного преобразователя производится при температуре детали не выше 50°C.

На рис. 3 показан спаянный по изложенной технологии преобразователь. Место пайки отличается равномерной, гладкой, серебристой галтелью. Испытания показали приемлемые характеристики для использования паяных магнитострикционных преобразователей в составе инструмента для ультразвуковой ударной обработки сварных металлоконструкций. На инструмент УУО, в

составе которого защищена указанная технология, получен патент [3].

#### Испытания технологии пайки в высоком вакууме аморфными припоями

В МИФИ-АМЕТО разработаны и выпускаются аморфные припои для пайки титана и сплавов на его основе [4]. Применяемые аморфные ленточные припои для пайки титана и его сплавов обладают рядом преимуществ по сравнению с кристаллическими аналогами: они пластичны, более однородны по химическому составу и структурному состоянию, имеют небольшую толщину и однородно плавятся по всему объёму.

Припои многокомпонентные: на основе циркония, титана, меди. Для отработки технологии пайки титана с пермендюром были применены: - припой СТЕМЕТ 1403 на основе циркония, содержащий титан, никель, медь; - припой СТЕМЕТ 1202 на основе титана, содержащий цирконий, никель, медь бериллий и ванадий. Отрабатывались: - пайка в среде аргона; - пайка в среднем и высоком вакууме; - пайка на различных температурных режимах.

Наиболее приемлемые результаты были получены при пайке с припоем СТЕМЕТ 1202 при соблюдении следующего режима: - высокий вакуум; - температура пайки=850°C с выдержкой 15 мин.; - на стадии охлаждения при T=650°C выдержка 1 час.

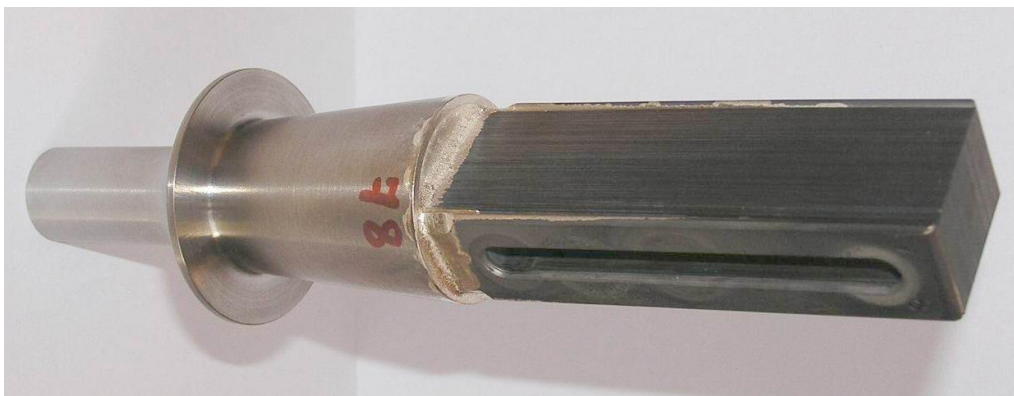


Рис. 3. Спаянный магнитострикционный преобразователь



Рис. 4. Установка для диффузионной сварки СДВУ-100

#### Испытания технологий диффузионной сварки

Известны разработки в области диффузионной сварки разнородных материалов, в том числе сварка металла с керамикой [5]. Для создания неразъёмного

соединения титанового сплава с пермендюром испытывались следующие технологии диффузионной сварки:

- Непосредственная сварка титана с пермендюром;

- Сварка через промежуточный слой, располагаемый между соединяемыми поверхностями.

В качестве промежуточных слоев испытывались ленты, изготовленные путём прессования ультрадисперсных порошков, на основе никеля - ЛНП-2 и меди - ЛМП-2.

В результате произведённых опытных сварных соединений и последующих испытаний было установлено, что без применения промежуточных слоёв получить неразъёмное соединение титана с пермендюром не удалось. Применение промежуточных слоёв ЛНП-2 и ЛМП-2 обеспечивает получение соединения, при этом прослойка на основе меди ЛМП-2 даёт лучшие результаты по прочности стыкового соединения.

Были отработаны технологические приемы подготовки деталей и режимы диффузионной сварки. Фактически процесс представляет собой диффузионную сварку-пайку, так как прослойка расплавляется и стык приобретает вид паяного соединения с образованием равномерной серебристой галтели по периметру.

Сварка-пайка производилась на установке СДВУ-100 (рис. 4).

Отработан следующий режим для соединения через прокладку из ЛМП-2. Производится вакуумирование до  $1,33 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. Выполняется радиационный нагрев от кольцевого теплового излучателя, расположенного в районе стыка. Ширина зоны нагрева  $\pm 10$  мм от плоскости стыка.

Температура сварки-пайки  $890^\circ\text{C}$ , время выдержки 3-5 мин. Усилие сжатия 0,1-0,2 кг/мм<sup>2</sup>.

Изготовленные преобразователи прошли испытания в составе рабочих инструментов для УУО.

Соединение выдерживает длительные интенсивные нагрузки.

#### Результаты испытания полученных соединений

В процессе отработки технологий производилось определение прочности сцепления паяного соединения - пакета пермендюра с титановым концентратором.

Для испытаний на статическое растяжение изготавливались специальные образцы (рис. 5), а также испытывались готовые преобразователи (рис. 6).

Разрыв происходил преимущественно по пластинам пермендюра, что свидетельствует о прочности паяного соединения выше прочности пермендюра.



Рис. 5. Разрыв образца паяного соединения

Разработанные технологии соединения титана с пермендюром обеспечили приемлемую прочность магнотриксционных преобразователей при работе в составе ультразвуковых ударных инструментов в производственных условиях при упрочнении сварных соединений различных конструкций.

Однако, преобразователи работают в условиях механических колебаний с ультразвуковой частотой в жидкой охлаждающей среде. Неизбежен кавитационный и коррозионный износ элементов конструкции преобразователя, с том числе и зоны соединения. На рисунке 7 показан характер такого износа паяного соединения.



Рис. 6. Разрыв преобразователя

Следует отметить, что работа преобразователя в составе рабочего ударного инструмента зачастую ведётся на максимальных мощностях, сильных ударных нагрузках, что не всегда является потребностью техпроцесса.

При работе на повышенных мощностях усиливается кавитационное и коррозионное воздействие на паяное соединение, ускоряется разрушение паяного стыка. Происходит даже «выедание» слоя припоя из-под стыка, что уменьшает прочность паяного стыка и приводит к разрушению преобразователя по пайке.



Рис. 7. Кавитационный износ паяного соединения

Учитывая вышеизложенное, наряду с предложениями по усилению технологического сопровождения практических работ с целью соблюдения режимов УУО, выполняются работы по дальнейшему повышению надежности и ресурса магнитострикционных преобразователей.

#### Заключение

Полученные технологические режимы могут быть использованы для получения равнопрочных неразъемных соединений деталей из титанового сплава 3М и пермендюра 49К2Ф, а также в качестве отправной точки для разработки технологии соединения иных титановых сплавов со специальными сплавами на основе железа.

#### Литература

1. E.S. Statnikov, V.O. Muktepavel. Technology of ultrasound impact treatment as a means of improving the reliability and endurance of welded metal structures. // Welding International. 2003. No.17(9), p.741-744.
2. Сварка в машиностроении. Справочник. Том 4. Под редакцией к.т.н. Ю.Н. Зорина. Машиностроение. М. 1979. Стр.346-350, стр. 357-362.
3. E.S. Statnikov, O.V. Korolov, V.O. Muktepavel, V.Y. Korostel Oscillating system and tool for ultrasonic impact treatment. Patent US 7276824 B2 Oct. 2, 2007.
4. Б.А. Калинин, О.Н. Севрюков, В.Т. Федотов, А.Н. Плющев, А.П. Яйкин. Новые аморфные припои для пайки титана и его сплавов // Сварочное производство. 2001. №3. С. 37-39.
5. А.В. Люшинский. Диффузионная сварка через промежуточные прокладки на основе смесей ультрадисперсных порошков металлов // Сварочное производство. 1992. №11 С. 22-27 и №12 С. 16-22.

#### References

1. E.S. Statnikov, V.O. Muktepavel. Technology of ultrasound impact treatment as a means of improving the reliability and endurance of welded metal structures. // Welding International. 2003. No.17(9), p.741-744.
2. Svarka v mashinostroyenii. Spravochnik. Tom 4. Pod redakciej k.t.n. YU.N. Zorina. Mashinostroyenie. M. 1979. Str.346-350, str. 357-362.
3. E.S. Statnikov, O.V. Korolov, V.O. Muktepavel, V.Y. Korostel Oscillating system and tool for ultrasonic impact treatment. Patent US 7276824 B2 Oct. 2, 2007.
4. B.A. Kalin, O.N. Sevryukov, V.T. Fedotov, A.N. Plyushchev, A.P. YAjkin. Novye amorfnye pripoi dlya pajki titana i ego spлавov // Svarochnoe proizvodstvo. 2001. №3. S. 37-39.
5. A.V. Lyushinskij. Diffuzionnaya svarka cherez promezhutochnye prokladki na osnove smesey ul'tradispersnyh poroshkov metallov // Svarochnoe proizvodstvo. 1992. №11 S. 22-27 i №12 S. 16-22.

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

**Вольдемар Освальдович Муктепавел**, старший преподаватель кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лопманская, 10-14, e-mail: voldemarmukt@mail.ru

**Voldemar O. Muktepavel**, Lecturer, Welding Of Ship Structures Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 10-14, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: voldemarmukt@mail.ru

**Вячеслав Михайлович Карпов**, старший преподаватель кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10-14, e-mail: clvr00@gmail.com

**Vyacheslav M. Karpov**, Lecturer, Welding Of Ship Structures Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 10-14, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: clvr00@gmail.com

**Илья Геннадьевич Струков**, инженер кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10-14, e-mail: strukov.i@gmail.com

**Ilya G. Strukov**, Engineer, Welding Of Ship Structures Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 10-14, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: strukov.i@gmail.com

Статья поступила в редакцию/ the article was submitted 10.11.2022.

Одобрена после рецензирования/ approved after reviewing 13.11.2022.

Принята к публикации/ accepted for publication 16.11.2022.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 534.21: 534.612

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.016>

### Валидация и верификация акустической модели на задаче обтекания тандема цилиндр – профиль NACA0012

М.А. Ливеринова<sup>1</sup> mary.liverinova@mail.ru, Н.В. Тряскин<sup>1</sup> nikita.tryaskin@smtu.ru

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

**Аннотация** Совершенствование численных методов для расчёта шума турбулентного течения остаётся актуальной задачей и позволяет решить ряд важнейших вопросов: оптимизация конструкций с целью снижения шума и избегания акустического загрязнения, определение уровней звукового давления с помощью математического эксперимента, техническая реализация которого более экономична, чем физический эксперимент. Основной целью работы является валидация и верификация акустической модели на задаче обтекания тандема цилиндр – профиль NACA0012 методом осреднения уравнений Навье-Стокса RANS и вихреразрешающим методом LES для сжимаемой и несжимаемой сред. В работе произведена оценка влияния сжимаемости среды, двумерности задачи и интенсивности турбулентности на акустические характеристики при обтекании тел. Для оценки получаемых результатов использованы экспериментальные данные. Для пересчёта акустических характеристик из ближнего акустического поля в дальнее использованы аналогия Кёрла и метод Фокс Вильямса-Хокинга (FWH). В результате анализа полученных результатов выявлено, что решение задачи методом RANS приводит к тому, что уровни звукового давления соответствуют экспериментальным данным только на основном пике спектра, наиболее близкие результаты к экспериментам даёт метод крупных вихрей. Решение акустических задач в двумерной постановке приводит к значительным отклонениям от эксперимента. В заключении сформулированы основные выводы о влиянии различных параметров на получаемые результаты.

**Ключевые слова:** CFD, численное моделирование, RANS, LES, акустические аналогии, аналогия Кёрла, метод FWH, обтекание цилиндра, обтекание профиля, гидродинамический шум, NACA0012.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме № 075-03-2020-094/1 от 10.06.2020.

**Для цитирования:** Ливеринова М.А., Тряскин Н.В. Валидация и верификация акустической модели на задаче обтекания тандема цилиндр – профиль NACA0012. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 2, С. 123—129.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.016>

### Validation and verification of the acoustic model for the problem of flow around a tandem cylinder – profile NACA0012

Mariya A. Liverinova<sup>1</sup> mary.liverinova@mail.ru, Nikita V. Tryaskin<sup>1</sup> nikita.tryaskin@smtu.ru

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

**Abstract** Development of a numerical methods for noise calculating is an actual problem, that allows us to solve a number of important issues such as: optimization of a constructions for noise reduction, determination of a sound pressure levels using a mathematical experiment, which is more economical than a physical experiment. The aim of the work is to validate and verify the acoustic model on the problem of flow around a tandem cylinder – NACA0012 profile by averaging the Navier-Stokes equations and by the vortex-resolving method for compressible and incompressible flow. The paper evaluates the influence of the compressibility of the flow, the two-dimensionality of the problem and the intensity of turbulence on the acoustic characteristics. Experimental data were used to evaluate the obtained results. The Curle analogy and the integration method of Ffowcs Willams - Hawkings (FWH) were used to recalculate the acoustic characteristics from the near acoustic field to the far one. As a result of the analysis of the obtained results, it was revealed that the solution of the problem by the RANS method leads to the fact that the sound pressure levels correspond to the experimental data only at the main peak of the spectrum, the closest results to the experiments are obtained by the method of Large Eddy Simulation. The solution of acoustic problems in a two-dimensional formulation leads to significant deviations from the experiment. The main conclusions about the influence of various parameters on the obtained results are formulated in the end of this work.

**Key words:** CFD, numerical simulation, RANS, LES, acoustic analogies, Curle analogy, FWH method, flow around a cylinder, flow around a profile, hydrodynamical noise, NACA0012.

**Financial Support:** The study was carried out as part of the state assignment on the topic № 075-03-2020-094/1 от 10.06.2020.

**For citation:** Mariya A. Liverinova, Nikita V. Tryaskin Validation and verification of the acoustic model for the problem of flow around a tandem cylinder – profile NACA0012. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 2. P. 123—129.

## Введение

Задачи, связанные с моделированием аэродинамического шума в ближнем и дальнем полях, получают всё большее распространение среди инженеров, которые занимаются экспериментом и вычислительной аэрогидродинамикой. К сожалению, несмотря на имеющуюся обширную теоретическую и экспериментальную базу, универсальной модели для численного расчёта дальнего поля при обтекании тел не найдено. Таким образом, совершенствование численных методов для расчёта шума турбулентного течения остаётся актуальной задачей.

Основной целью работы является валидация и верификация акустической модели на задаче обтекания тандема цилиндр – профиль NACA0012 методом осреднения уравнений Навье-Стокса RANS и вихреразрешающим методом LES для сжимаемой и несжимаемой сред.

Одним из первых в 1878 году, кто связал генерацию звука с движением жидкости, стал В. Струхаль [1], который экспериментально исследовал эоловы тона, возникающие при обтекании проволоки. В 1915 году J.W.S. Rayleigh [2] в своей работе «Теория звука» заложил теоретическую базу для исследования звука при движении потоков жидкости и положил начало развитию аэроакустики.

Практические аспекты заложены в работах Л.Я. Гутина «О звуковом поле вращающегося винта» (1936) [3], Д.И. Блохинцева «Акустика неоднородной движущейся среды» (1946) [4] и M.J. Lighthill «О шуме турбулентных струй» [5] – [6], благодаря которому был введен термин «аэродинамический звук».

М.С. Jacob в работе [7] провёл эксперимент по исследованию шума профиля NACA0012, для большей степени турбулизации потока автор расположил круговой цилиндр перед профилем.

Вопросы влияния масштабных эффектов при экспериментальных исследованиях акустических характеристик реактивного двигателя самолета в своих работах рассмотрел K. Viswanathan [8] – [9].

С.Ю. Крашенинников и А.К. Миронов в работах [10]-[12] изучили характер акустических возмущений и с помощью экспериментальных установок определили положение источников шума дозвуковых турбулентных струй, истекающих из осесимметричных сопел.

Е. Sjöberg в своей работе [13] использовала акустические аналогии для отделения генерации звука от его распространения на примере задачи обтекания цилиндра в качестве валидации собственного кода и задачи бокового зеркала. Полученные результаты хорошо согласуются с предыдущими исследованиями других авторов.

В. Greschner, F. Thiele, D. Casalino и М.С. Jacob провели исследования [14], связанные с оценкой моделирования турбулентности при прогнозировании широкополосного шума, создаваемого потоком, проходящим через многостержневую конфигурацию. Шум в дальнем поле рассчитывается согласно аналогии Ffowcs

Williams – Hawking (FWH). Рассматривается обтекание профиля NACA0012 в следе за стержнем в докритическом режиме обтекания. Исследования демонстрируют различие результатов, полученных рассмотренными методами, также оценивают влияние модели турбулентности и численных схем.

А. Епихин, И. Евдокимов, М. Крапошин, М. Калугин и С. Стрижак разработали динамическую библиотеку libAcoustics. В библиотеке реализована аналогия FWH, аналогия Кёрла и модуль решения уравнения Гельмгольца методом граничных элементов. В работе [15] производится расчет акустического поля для конфигурации цилиндр – профиль крыла NACA 0012. В результате численного использования аналогии Кёрла авторами были получены следующие характеристики: звуковое давление при обтекании произвольных тел, спектр шума в ближнем и дальнем поле. Данные сравнены с экспериментальными.

Изучив труды, посвященные данному вопросу, сделаны выводы:

1. Экспериментальное исследование акустического шума даёт точные сведения о его характере и происхождении, но данный метод является трудоемким и дорогостоящим.

2. В настоящее время наиболее часто используются метод крупных вихрей и решение осреднённых уравнений Навье-Стокса, а также гибридные методы, которые стремительно развиваются, сочетая в себе лучшие качества обоих методов.

3. С целью уменьшения затрат вычислительных ресурсов используют интегральные методы для расчёта акустического шума в дальнем поле: метод Кирхгофа и Фокса Вильямса-Хоккинса.

## 1. Математическая постановка задачи

В задаче о численном моделировании обтекания профиля NACA0012, находящегося в следе за круговым цилиндром, решаются уравнения Навье-Стокса и неразрывности, осреднённые по Рейнольдсу при решении RANS методом, либо осреднённые по пространству при использовании LES подхода. Численная реализация задачи осуществляется методом контрольного объёма. Рассматривается как плоская, так и трёхмерная задача, обращённое движение.

Ниже описана система уравнений при решении задачи для сжимаемой среды (1), для несжимаемой среды (2), все переменные и константы описаны в [17].

Для замыкания систем уравнений (1) и (2) в методе RANS используется градиентно-диффузионная гипотеза и уравнения переноса для модели турбулентности  $k-\omega$  SST, которая была использована в работе [16]. Для замыкания систем при решении методом крупных вихрей использована подсеточная модель Spalart-Allmaras DDES (Delayed Detached Eddy Simulation).

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) &= 0 \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ji} + \bar{\tau}_{t/SGS,ji}) \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[ \bar{\rho} \left( \tilde{e} + \frac{\tilde{u}_i \tilde{u}_i}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \bar{\rho} \tilde{u}_i \left( \tilde{h} + \frac{\tilde{u}_i \tilde{u}_i}{2} \right) \right] &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{q}_j + \bar{q}_{t,j}] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\tilde{u}_i (\bar{\tau}_{ji} + \bar{\tau}_{t/SGS,ji})] \\ \bar{\rho} &= \frac{p m}{R T} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где индекс t обозначает «turbulent» и используется при решении задачи методом RANS, переменные с данным индексом выражают влияние турбулентных структур на осредненное решение, переменные с индексом SGS описывают влияние вихревых структур, не превышающих размера фильтра, на решение системы, используется при решении задачи методом LES.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Для решения системы дифференциальных уравнений приняты следующие обобщенные граничные условия:

на входной границе (рисунок 1):  $\vec{u} = \vec{u}_\infty$ ,  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ,  $T = T_0$ , где  $\vec{u}_\infty$  – скорость набегающего потока,  $k$  и  $\omega$  рассчитаны по методу пристеночных функций;

на выходной границе:  $p = p_0$ ,  $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ;

на верхней границе:  $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ,  $k$  и  $\omega$  рассчитаны по методу пристеночных функций;

на нижней границе:  $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ;

на поверхности цилиндра и профиля:  $\vec{u} = 0$ ,  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ,  $T = T_0$ , поверхность цилиндра считается теплоизолированной,  $k$  и  $\omega$  рассчитаны по методу пристеночных функций.

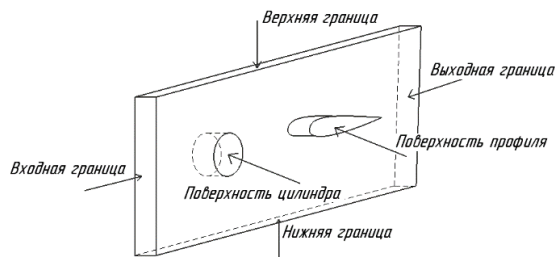


Рис. 1. Схематическое обозначение границ расчётной области.

## 2. Определение сеточно-независимого решения

Поиск сеточно-независимого решения произведен для коэффициента сопротивления профиля: суммарной составляющей  $C_d$  и для коэффициентов трения  $C_v$  и давления  $C_p$ . Построены

зависимости перечисленных коэффициентов от безразмерной величины  $y^+$ , выраженной через отстояние данной точки потока от стенки:

$$y^+ = \frac{y U^*}{\nu} \quad (5)$$

где  $U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  – динамическая скорость,

характеризующая напряжение трения у стенки, отнесённое к плотности жидкости. На рисунке 2 представлены результаты определения сеточной сходимости: выявлена расчётная сетка, при которой коэффициент сопротивления не изменяется при дальнейшем увеличении количества расчётных ячеек.

В результате поиска сеточно-независимого решения выбрана расчётная сетка, при которой  $y_{min}^+ = 0.46$ ,  $y_{max}^+ = 18.1$ ,  $y_{average}^+ = 9.1$ .

Общее количество ячеек для двумерного случая порядка 240000. Для трёхмерной задачи (20% размаха) количество ячеек порядка 6 миллионов. Шаг по времени составляет 0.1% от периода колебания силы сопротивления.

## 3. Результаты численного моделирования

### Исходные данные

Рассмотрен двумерный круглый цилиндр и профиль NACA0012, обтекаемые однородным потоком, движущегося со скоростью  $u_\infty = 72$  м/с, что соответствует числам Рейнольдса  $Re_d = \frac{u_\infty d}{\nu_\infty} = 4.8 * 10^4$ ,  $Re_b = \frac{u_\infty b}{\nu_\infty} = 4.8 * 10^5$ , где  $d$  – диаметр цилиндра,

$b$  – хорда профиля, а также соответствует числу Маха  $M = \frac{u_\infty}{c_0} = 0.2$ , где  $c_0$  – скорость звука.

Параметры данной задачи выбраны в соответствии с экспериментом [7]. Задача решена в двумерной и трёхмерной постановках, в трёхмерной постановке размах  $L$  составляет 20% и 50% от хорды. При пересчёте акустических характеристик наблюдатель расположен в точке, расположенной сверху на расстоянии  $R/b = 1.85$  от центральной точки хорды профиля.

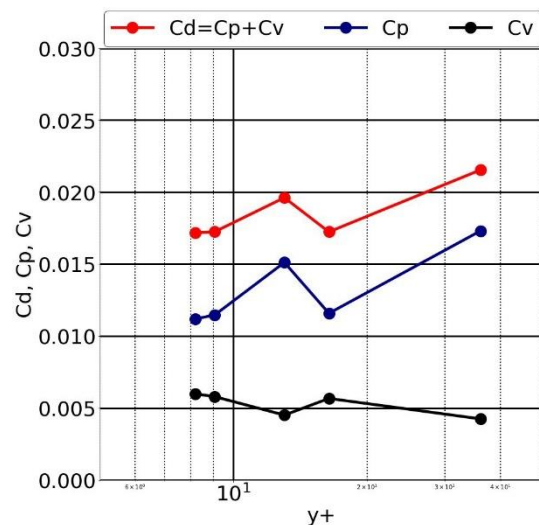


Рис. 2. Определение сеточно – независимого решения

*Поля давлений*

На рисунках 3 — 4 представлены поля давлений, отнесенных к скоростному напору, для сжимаемой и несжимаемой среды для плоской постановки задачи. Для сжимаемой среды заметны «ромбовидные» контуры давления и хорошо просматривается волновая картина, для несжимаемой среды наблюдаются только зоны с пониженным давлением в дорожке Кармана. Причина такого различного поведения заключается в том, что в несжимаемом течении волны распространяются с бесконечно большой скоростью. Такое поведение подтверждает неправомерность использования проницаемых контрольных поверхностей для метода FWH совместно с несжимаемым расчетом основного течения.

*Акустические характеристики*

В результате расчёта акустического шума при обтекании тандема цилиндр — профиль однородным потоком построены уровни звукового давления.

На рисунке 5 приведены уровни звукового давления в зависимости от числа Струхала вихревых сходящихся структур для сжимаемой и несжимаемой сред, полученные при решении задачи методом LES, для RANS метода результаты представлены на рисунке 6.

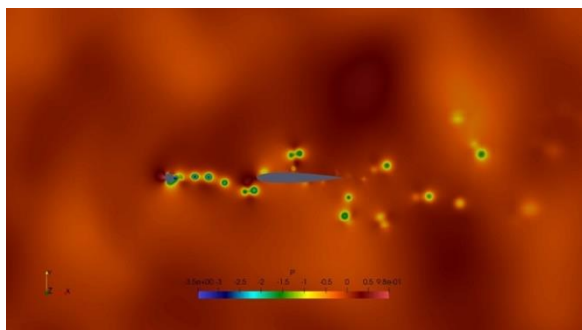


Рис. 3. Поле давлений, для сжимаемого течения, метод LES

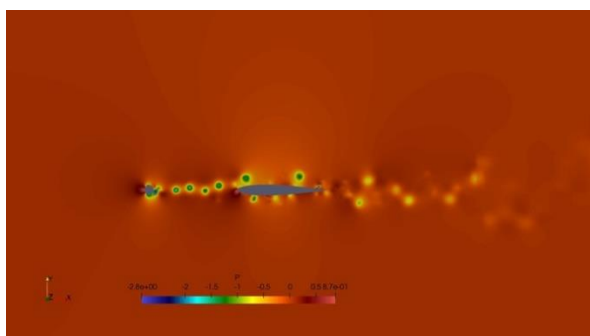


Рис. 4. Поле давлений, для несжимаемого течения, метод LES

Из анализа полученных результатов можно сделать выводы о том, что решение поставленной задачи в несжимаемой постановке приводит к заниженным относительно эксперимента уровням звукового давления. Решение осреднённых по

Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса приводит к тому, что учитывается шум только от некоторых вихрей, характер кривой не согласуется с экспериментом.



Рис. 5. Уровни звукового давления для сжимаемой и несжимаемой сред, метод LES



Рис. 6. Уровни звукового давления для сжимаемой и несжимаемой сред, метод RANS

При анализе графика, представленного на рисунке 7, можно отметить хорошее согласование полученных спектров как для двухмерного, так и для трёхмерного случаев с экспериментом (таблица 1). Наблюдается смещение частоты характерного пика в область более высоких частот, для двухмерного случая данное смещение больше.

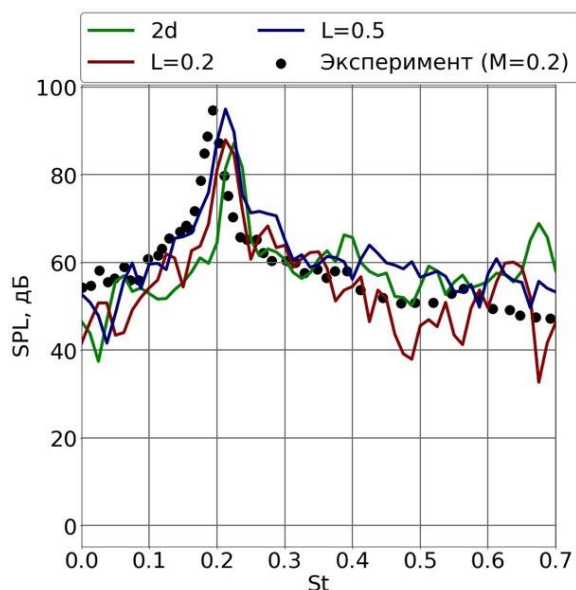


Рис. 7. Уровни звукового давления, полученные для двумерной и трёхмерных постановок задачи

Из анализа рисунка 8 можно сделать выводы о малом влиянии задаваемой в начальных условиях интенсивности турбулентности на акустические характеристики: для всех рассмотренных интенсивностей турбулентности спектры близки как по амплитудным, так и по частотным характеристикам, что справедливо для плохообтекаемого тела.

Таблица 1

**Уровни звукового давления и частоты характерного пика для эксперимента и расчётов**

|                        | SPL, дБ | St   |
|------------------------|---------|------|
| Эксперимент [7]        | 94.7    | 0.19 |
| Расчёт, 2d             | 87.2    | 0.23 |
| Расчёт, 3d, $L = 0.2b$ | 87.9    | 0.21 |
| Расчёт, 3d, $L = 0.5b$ | 94.9    | 0.21 |

На рисунке 9 представлены уровни звукового давления для различных скоростей обтекания: изменение скорости приводит к смещению характерного пика в область более высоких частот, а также к увеличению амплитудного значения спектра.

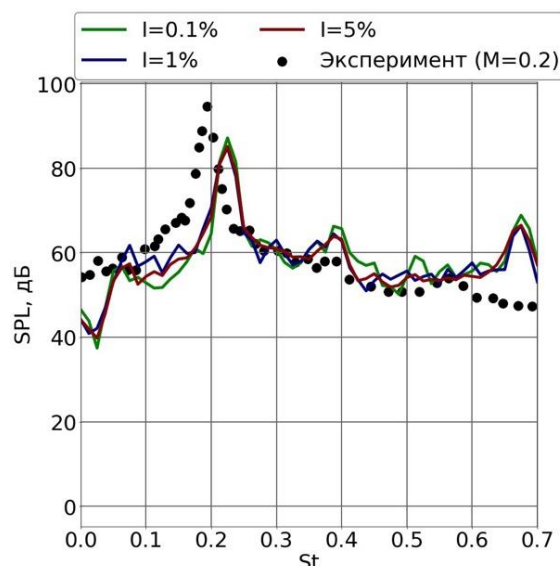


Рис. 8. Спектры звукового давления, полученные при различных интенсивностях турбулентности

На рисунке 11 представлены спектры звукового давления, полученные пересчётом пульсаций давлений на контрольных поверхностях, обозначенных на рисунке 10, методом FWH, а также спектры звукового давления, полученные по аналогии Кёрла для поверхности цилиндра. Рассмотрены следующие контрольные поверхности: охватывающая поверхность цилиндра, охватывающая профиль и охватывающая оба объекта. Данные получены при решении задачи методом LES. Из анализа графика необходимо отметить то, что спектры, полученные методом FWH, имеют значительно больший уровень шума (порядка 20 дБ), чем результаты по аналогии Кёрла и экспериментальные. Характер кривых для соответствующих поверхностей схож, пики находятся на одинаковых частотах.

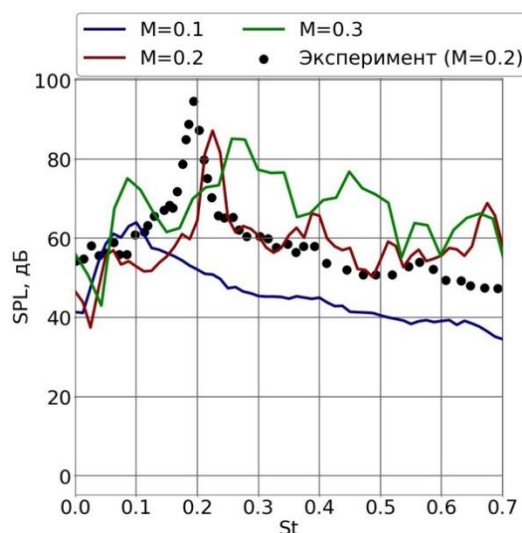


Рис.9 — Спектры звукового давления, полученные при различных числах Маха для задачи обтекании тандема цилиндр – профиль

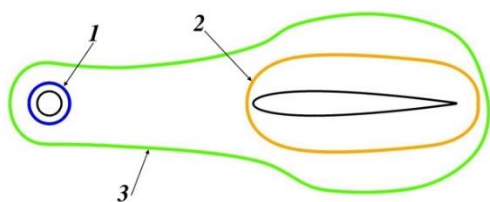


Рис. 11 — Контрольные поверхности для пересчёта пульсаций давлений методом FWH

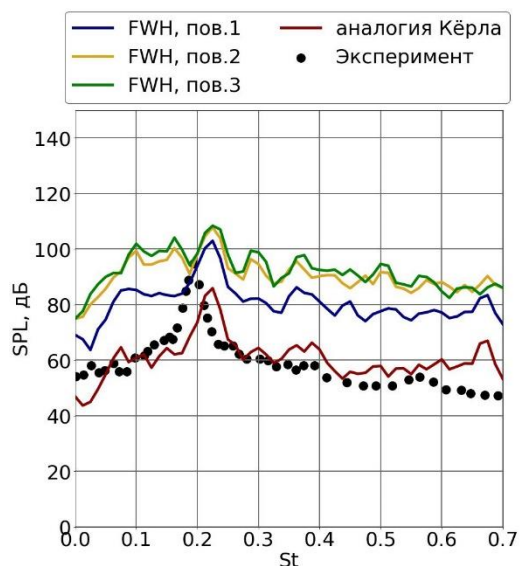


Рис. 11 — Уровни звукового давления, полученные методом FWH и по аналогии Кёрла.

### Заключение

В работе рассмотрено влияние сжимаемости среды, выбора метода решения: метод крупных вихрей и решение системы осредненных уравнений Навье-Стокса и неразрывности, а также оценка влияния двумерности задачи. В ходе решения задачи определено сеточно-независимое решение, а также отработаны начальные и граничные условия. произведён расчёт гидродинамических и акустических характеристик для задачи об обтекании тандема цилиндр – профиль. Для непосредственного CFD-расчета шумоизлучения необходимо использовать LES метод с учетом сжимаемости среды в полной трехмерной постановке, не учёт сжимаемости среды и трёхмерности течения приводит к существенным ошибкам. 2) В качестве инженерной модели шумоизлучения в дальнем поле может быть использована аналогия Керла, основанная на результатах LES моделирования течения вблизи тела.

### Литература

1. V. Strouhal, Über eine besondere Art der Tonerregung, Annalen Phys. Chem. (Leipzig) 3(5), 216–251, (1878).
2. J.W.S. Rayleigh, Aeolian tones, Phil. Mag., 29, 434–444, (1915).
3. Гутин Л.Я. О звуковом поле вращающегося винта // ЖТФ, т.6, вып.5, 1936;
4. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. – 1946. – 220 с.: ил.
5. M.J. Lighthill, On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound, Proc. Roy. Soc., A, 222, 1–32, (1954).
6. M.J. Lighthill, On sound generated aerodynamically: 1. General theory, Proc. Roy. Soc., A 211, 564–578, (1952).
7. M.C. Jacob, J. Boudet, D. Casalino, M. Michard, A rod-airfoil experiment as benchmark for broadband noise modelling, J. Theoret. Comput. Fluid Dyn., 19(3), 171-196, (2005).
8. Viswanathan, K. Instrumentation considerations for accurate jet noise measurements. / AIAA Journal 44, No. 6, June 2006, pp. 1137-1149.
9. Viswanathan, K. Jet aeroacoustic testing: issues and implications. / AIAA Journal 41, No. 9, September 2003, pp. 1674-1689.
10. Крашенинников С. Ю., Миронов А. К. О свойствах течения в турбулентной струе и экспериментальном определении положения источников звука. Ученые записки ЦАГИ, том x1 2012 № 4 УДК 532.522.2; 534.83
11. Крашенинников С. Ю., Миронов А. К. Определение положения источников звука в турбулентной струе по результатам акустических и термоанемометрических измерений / Москва. Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, 2011 г.
12. E.Sjoberg. Implementation of Aeroacoustic Methods in OpenFOAM.
13. V.Greschner, F.Thiele, D.Casalino, M.C.Jacob. Influence of turbulence modeling on the broadband noise simulation for complex flows
14. Andrey Epikhin, Ilya Evdokimov, Matvey Kraposhin, Michael Kalugin, Sergei Strijhak. Development of a Dynamic Library for computational aeroacoustics applications using the OpenFOAM Open Source Package. 4<sup>th</sup> International Young Scientists Conference on Computational Science. Procedia Computer Science, v66, 2015, p.150-157
15. Павловский В.А., Никущенко Д.В. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы: Учебное пособие. – СПб.: Издательство Лань, 2018.
16. Revell, J.D., Prydz, R.A., Hays, A.P. Experimental Study of Airframe Noise vs Drag Relationship for Circular Cylinders. Lockheed-California Co. 1 R 28074, 25 Feb., 1977
17. Ткаченко И.В. Современные методы решения задач гидродинамики: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. – 59 с.

## References

1. V. Strouhal, Über eine besondere Art der Tonerregung, Annalen Phys. Chem. (Leipzig) 3(5), 216–251, (1878).
2. J.W.S. Rayleigh, Aeolian tones, Phil. Mag., 29, 434–444, (1915).
3. Gutin L.YA. O zvukovom pole vrashchayushchegosya vinta [About the sound field of a rotating screw] // ZHTF, t.6, vyp.5, 1936;
4. Blohincev D. I. Akustika neodnorodnoj dvizhushchejsya sredy [Acoustics of an inhomogeneous moving flow]. – 1946. – 220 s.: il.
5. M.J. Lighthill, On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound, Proc. Roy. Soc., A. 222, 1–32, (1954).
6. M.J. Lighthill, On sound generated aerodynamically: 1. General theory, Proc. Roy. Soc., A 211, 564–578, (1952).
7. M.C. Jacob, J. Boudet, D. Casalino, M. Michard, A rod-airfoil experiment as benchmark for broadband noise modelling, J. Theoret. Comput. Fluid Dyn., 19(3), 171–196, (2005).
8. Viswanathan, K. Instrumentation considerations for accurate jet noise measurements. / AIAA Journal 44, No. 6, June 2006, pp. 1137–1149.
9. Viswanathan, K. Jet aeroacoustic testing: issues and implications. / AIAA Journal 41, No. 9, September 2003, pp. 1674–1689.
10. Krashennikov S. YU., Mironov A. K. O svoystvah techeniya v turbulentnoj strue i eksperimental'nom opredelenii polozheniya istochnikov zvuka [On the properties of flow in a turbulent jet and the experimental determination of the position of sound sources] uchenye zapiski CAGI tom x1 2012 № 4 UDK 532.522.2; 534.83
11. Krashennikov S. YU., Mironov A. K. Opredelenie polozheniya istochnikov zvuka v turbulentnoj strue po rezul'tatam akusticheskikh i termoanemometricheskikh izmerenij [Determination of the position of sound sources in a turbulent jet based on the results of acoustic and hot-wire measurements] / Moskva. Central'nyj institut aviacionnogo motorostroeniya im. P.I. Baranova, 2011 g.
12. E.Sjoberg. Implementation of Aeroacoustic Methods in OpenFOAM.
13. B.Greschner, F.Thiele, D.Casalino, M.C.Jacob. Influence of turbulence modeling on the broadband noise simulation for complex flows
14. Andrey Epikhin, Ilya Evdokimov, Matvey Kraposhin, Michael Kalugin, Sergei Strijhak. Development of a Dynamic Library for computational aeroacoustics applications using the OpenFOAM Open Source Package. 4<sup>th</sup> International Young Scientists Conference on Computational Science. Procedia Computer Science, v66, 2015, p.150-157
15. Pavlovskij V.A., Nikushhenko D.V. Vychislitel'naja gidrodinamika. Teoreticheskie osnovy: Uchebnoe posobie [Computational Fluid Dynamics. Theoretical Foundations: Study Guide]. – SPb.: Izdatelstvo Lan, 2018.
16. Revell, J.D., Prydz, R.A., Hays, A.P. Experimental Study of Airframe Noise vs Drag Relationship for Circular Cylinders. Lockheed-California Co. 1 R 28074, 25 Feb., 1977
17. Tkachenko I.V. Sovremennyye metody resheniya zadach gidrodinamiki [Modern methods for solving problems of hydrodynamics]: ucheb. posobie. – SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2014. – 59 s.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Мария Алексеевна Ливеринова**, лаборант кафедры Гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: mary.liverinova@mail.ru

**Mariya A. Liverinova**, laboratory assistant of the Department of the fluid mechanics and marine acoustics, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: mary.liverinova@mail.ru

**Никита Владимирович Тряскин**, кандидат технических наук, доцент кафедры Гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

**Nikita V. Tryaskin**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of the Fluid Mechanics and Marine Acoustics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 03.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.



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 1800 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.

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**

**Скорухов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.**

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**