

4 Hz | 86 Hz | 170 Hz | 340 Hz | 679 Hz | 1.3 kHz | 2.6 kHz | 5.1 kHz | 10.1 kHz | 20 kHz

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101 ISSN 2073-7173 (print)  
1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010 ISSN 2588-0233 (on line)  
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110  
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100  
00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101  
11011100110010101111001010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010  
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001  
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100  
001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



№ 1 часть 2 2021  
№ 1 part 2 2021



**Труды  
Санкт-Петербургского  
государственного морского технического университета**





# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 том 2 2021 Сквозной номер 51

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.

**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 и в международную реферативную базу данных Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI).**

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 включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library и в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI). Для аспирантов публикации бесплатно.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

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

Шифр	Отрасль науки, группа специальностей	по которым присуждается ученая степень
05.08.00	Кораблестроение	
05.08.01	Теория корабля и строительная механика	Технические
05.08.03	Проектирование и конструкция судов	Технические
05.08.04	Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства	Технические, экономические
05.08.05	Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)	Технические
05.08.06	Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие	Технические, Физико-математические
05.13.00	Информатика, вычислительная техника и управление	
05.13.01	Системный анализ, управление и обработка информации	Технические, Физико-математические
05.13.06	Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)	Технические
05.13.10	Управление в социальных и экономических системах	Технические
05.13.11	Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей	Технические, Физико-математические
05.13.12	Системы автоматизации проектирования	Технические, Физико-математические
05.13.17	Теоретические основы информатики	Технические, Физико-математические
05.13.18	Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ	Технические, Физико-математические

Рукописи и документы к статье представляются в редакцию в электронном виде (e-mail: [mit-journal@mail.ru](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», 2021

ISSN 2073-7173 (print)  
ISSN 2588-0233 (on line)



# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

(Morskie intelektual'nye tehnologii)

Scientific journal № 1 part 2 2021 [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 journal.

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

Frequency of publication - quarterly.

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

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

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

### Journal headings:

- Ship Building,
- Theory of Ship and Structures,
- Ship Designing and Structure,
- Technology of Ship Building,
- Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production,
- Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary),
- Physical Fields of Ship, Ocean, Atmosphere and Their Interaction); Information Science,
- Computer Engineering and Control System Analysis,
- Control and Processing of Information,
- Automation and Control of Processes and Productions,
- Control in Social and Economic Systems,
- Software for Computers,
- Complexes and Computer Networks,
- Designing Automation Systems,
- Foundations of Information Science,
- Mathematical Modelling, Numerical Procedures and Software Systems.

**The journal is coming since 2008**

**Publication frequency - quarterly.**

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, 2021



ISSN 2073-7173 (print)  
ISSN 2588-0233 (on line)

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

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

**Главный редактор:**

**Н.В. Никитин, д.т.н., профессор**

**Редакционная коллегия**

**Заместители главного редактора**

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

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта РАН, Санкт-Петербург

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

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

**Члены редколлегии**

А.В. Алексеев, д.т.н., профессор Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Р.В. Борисов д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

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

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

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

А.Н. Дядик, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

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

Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

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

В.В. Родионов, к.т.н, с.н.с., ЗАО «Си Проект», Санкт-Петербург

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

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

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

**Редакционный совет**

**Сопредседатели**

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

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

**Члены редакционного совета**

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

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, генеральный директор, НИЦ "МОРИНТЕХ», Санкт-Петербург

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

С.П. Столяров, к.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и автоматики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 2073-7173 (print)  
ISSN 2588-0233 (on line)

# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

(Morskie intellektual'nye tehnologii)

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

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

## Chief Editor

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

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

A.I. Gaykovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
D.A. Skorokhodov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

A.I. Frumen, PhD, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

P.A. Shaub, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, St. Petersburg, Russia

### Members of Editorial Staff

A.V. Alekseev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

R.V. Borisov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Yu.A. Vlasov, Cand. Sci. (Phys & Math), Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

M.V. Voyloshnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

A.Sh. Gotman, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberia State University of water transport, Novosibirsk, Russia

A.N. Dyadik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

V.A. Evteev, Dr. Sci. (Eng.), United Shipbuilding Corporation, St. Petersburg, Russia

F.F. Legusha, Dr. Sci. (Phys. & Math.), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg, St. Petersburg, Russia

Yu.I. Nechayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

V.V. Rodionov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project", St. Petersburg, Russia

V.Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

N.A. Taranukha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

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

## Editorial Board

### Co-chairmen

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

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

### Council Members

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

A.I. Gajkovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies", St. Petersburg, Russia

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

S.P. Stoljarov, Cand. Sci. (Eng), Professor, Dean of the Faculty of naval power and automation, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

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

- **Сергей Павлович Глушков**, доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный университет водного транспорта,
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Олег Николаевич Петров**, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Иван Борисович Друзь**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Сергей Павлович Столяров**, кандидат технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Николай Яковлевич Синявский**, доктор физико-математических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Владимир Ильич Комашинский**, доктор технических наук, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Юрий Павлович Потехин**, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Алексей Валерьевич Соловьев**, доктор технических наук, Российский Речной Регистр Верхне-Волжский Филиал
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Олегович Токарев**, доктор технических наук, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Рудольф Васильевич Борисов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова

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

- **Sergei P. Glushkov**, Dr.Sci.(Eng), Professor, Siberian State University of Water Transport
- **Alexander A. Rodionov**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Gennady P. Kicha**, Professor, Dr.Sci.(Eng), Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi
- **Ivan B. Druz**, Dr.Sci.(Eng), professor, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi
- **Sergei V. Chekhranov**, Dr.Sci.(Eng), Professor, Far Eastern State Technical Fisheries University
- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science,
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Nikolay Ya. Sinyavsky**, Dr. Sci. (Phys & Math), ProfessorKaliningrad State Technical University
- **Vladimir I. Komashinsky**, Dr.Sci.(Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Yuri P. Potekhin**, Ph.D. (Eng), Saint Petersburg State Marine Technical University
- **Alexey V. Solovev**, Dr. Sci. (Eng), Russian River Register Upper Volga branch
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Alexander O. Tokarev**, Dr.Sci.(Eng), Siberian State University of Water Transport
- **Rudolf V. Borisov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
- **Stepan Y. Malamanov**, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova.





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





# 51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

Санкт-Петербург  
190000, Английская наб., д. 38  
Тел./факс: (812) 315 4945

Санкт-Петербург, Ломоносов  
198412, ул. Михайловская, д. 14  
Тел./факс: (812) 423 1600

Выполнение функций проектанта по более чем 120 проектам кораблей и судов ВМФ иностранной постройки.

Разработка технической документации для обеспечения модернизации, ремонта и сервисного обслуживания кораблей и судов ВМФ.

Разработка документов по стандартизации (ГОСТ РВ, ОСТВ и др.).

Сбор и хранение копий технических условий на продукцию, разработанную по заказам Минобороны России и поставка их исполнителям ГОЗ.



СОДЕРЖАНИЕ	стр
<b>ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>Манухин В.А.</b> Расчет V-образных перекрытий.....	11
<b>Семенова В.Ю., Баканов К.И.</b> Определение коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при совместной качке двух судов на мелководье параллельно вертикальной стенке.....	16
<b>Багринцев В.В., Макарова В.В., Потехин Ю.П.</b> Исследование влияния размерности математической модели движения судна на результат прогнозирования его управляемости.....	26
<b>Макарова В.В., Мьо Тху Киав, Потехин Ю.П.</b> Исследование динамических наклонов судов под действием шквала в рамках условий критерия погоды.....	35
<b>Ливеринова М.А., Тряскин Н.В.</b> Численное определение движения профиля над экраном и определение его аэродинамических характеристик.....	44
<b>Мелконян А.Л., Николаев Д.А., Чулкин М.В.</b> Расчет параметров вынужденных установившихся колебаний трубопровода.....	51
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ</b>	
<b>Алексеев А.В.</b> Методика инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники и морской инфраструктуры.....	60
<b>Гайкович А.И.</b> Оптимизация корабля, использующая предпочтения проектанта.....	68
<b>ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>Пласкеева Е.И., Полянская Д.А., Трусов В.И., Ходжаев Р.С., Черкаев Г.В.</b> Атмосферостойкие системы покрытия для судостроительной верфи.....	75
<b>СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)</b>	
<b>Вахрушев К.С., Дементьев В.Б., Пушкарев А.Э., Блинков А.П.</b> Анализ способов изготовления разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей и выбор инструмента для его реализации.....	79
<b>Чистяков А.Ю., Горелик Г.Б., Мозолев О.Н.</b> Возможности применения водотопливной эмульсии с целью расширения рабочего диапазона дизеля и совершенствования процессов топливоподачи...	87
<b>Черкаев Г.В.</b> Анализ выбросов загрязняющих веществ от судовых двигателей при сжигании традиционных и альтернативных видов топлив.....	97
<b>ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ</b>	
<b>Ивановский А.Н., Марковкина Н.Н., Черный С.Г.</b> Выделение марки углубления на изображении с использованием алгоритмов компьютерного зрения.....	102
<b>АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ</b>	
<b>Баранец И.В., Ваганов Г.В., Гайдукова Л.В., Краснов А.В., Легуша Ф.Ф., Никитин Г.А., Пугачев С.И., Рытов Е.Ю.</b> Исследование влияния наполнителей системы ЦТС на структуру и физико-механические характеристики эпоксидного клея ДМ-5-65.....	108
<b>Соболев А.С., Ерофеев П.А., Яшонков А.А., Фалько А.Л., Епифанцев И.Р.</b> Определение сложности алгоритма динамических характеристик управляемого процесса морского объекта.....	114

<b>CONTENTS</b>	page
<b>THEORY OF SHIP AND STRUCTURES</b>	
<b>Vadim A. Manukhin</b> Calculation of V-shaped overlaps.....	11
<b>Viktoriya Yu. Semenova, Kirill I. Bakanov</b> Determination of the added masses and damping coefficients during coupled motions of two ships in shallow water parallel to the vertical wall.....	16
<b>Viktor V. Bagrintsev, Valentina V. Makarova, Yuri P. Potekhin</b> Investigation of the influence of the dimensionality of the mathematical model of the ship's motion the result of predicting its controllability.....	26
<b>Valentina V. Makarova, Myo Thu Kiav, Yuri P. Potekhin</b> Investigation of the dynamic inclinations of vessels under the action squall within the conditions of the weather criterion.....	35
<b>Mariya A. Liverinova, Nikita V. Tryaskin</b> Numerical determination of aerodynamic characteristics of an airfoil in a ground effect.....	44
<b>Armen L. Melkonian, Dmitry A. Nikolaev, Mikael V. Chuklin</b> Calculation of parameters of forced steady - state fluctuations of the pipeline.....	51
<b>SHIP DESIGNING AND STRUCTURE</b>	
<b>Anatoly V. Alekseev</b> Method of invariant assessment of quality and efficiency marine engineering and marine infrastructure facilities.....	60
<b>Alexander I. Gaikovich</b> Ship optimization using the preferences of the designer.....	68
<b>SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION</b>	
<b>Ekaterina I. Plaskeeva, Daria A. Polyanskaya, Valery I. Trusov, Rustam S. Khodjaev, Georgy V. Cherkaev</b> Atmospheric resistance coating systems for shipboard yard.....	75
<b>SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)</b>	
<b>Konstantin S. Vahrushev, Vyacheslav B. Dementiev, Andrei E. Pushkarev, Alexey P. Blinkov</b> Analysis of methods of manufacturing of differently multi-directional internal twist grooves of tubular body parts and selection of tools for its implementation.....	79
<b>Alexandr Yu. Chistyakov, Gennadiy B. Gorelik, Oleg N. Mozolev</b> Possibilities of using water-fuel emulsion in order to extend the diesel operating range and improvement of fuel supply processes.....	87
<b>Georgy V. Cherkaev</b> Analysis of pollutant emissions from marine engines when burning traditional and alternative fuels.....	97
<b>INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS</b>	
<b>Aleksei N. Ivanovskii, Natalia N. Markovkina, Sergei G. Cherniy</b> Draft mark recognition with computer vision algorithms.....	102
<b>AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS</b>	
<b>Irina V. Baranets, Gleb V. Vaganov, Ludmila V. Gaydukova, Aleksey V. Krasnov, Fedor F. Legusha, German A. Nikitin, Sergey I. Pugachev, Evgeny Yu. Rytov</b> Study of the effect of fillers PZT on the structure and physical-mechanical properties of epoxy glue DM-5-65.....	108
<b>Alexandr S. Sobolev, Pavel A. Erofeev, Alexander A. Yashonkov, Alexander L. Falko, Ignat R. Epifantsev</b> Determining the complexity of the algorithm of the dynamic characteristics of the controlled process of the marine object.....	114

## ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5.015.4

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.020

## Расчет V-образных перекрытий

В.А. Манухин<sup>1</sup> e-mail: nikal6@mail.ru<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В статье приводится краткое описание и сравнение двух приближенных методик учета килеватости V-образных перекрытий при расчетах их прочности и жесткости. В обеих методиках килеватость учитывается введением добавочной жесткости центральной продольной балки, при этом само перекрытие рассматривается как плоское. Отличие методик заключается в различном подходе к оценке добавочной жесткости центральной балки и учете зависимости добавочной жесткости от угла килеватости, соотношения размеров перекрытия, наличия распора продольных кромок перекрытия. Расчеты по обеим методикам сравниваются с «эталонным» решением, полученным методом конечных элементов. Для простейшего V-образного перекрытия с одной продольной центральной балкой исследовано влияние на результаты вычислений угла килеватости и распора продольных кромок перекрытия. Показано, что оба приближенных подхода дают в целом надежные оценки прогиба перекрытия и напряженного состояния в середине пролета центральной балки, однако наибольшие нормальные напряжения в опорных сечениях центральной балки ими существенно занижаются.

**Ключевые слова:** угол килеватости, распор, добавочная жесткость, численное моделирование, локальные напряжения, центральная балка.

## Calculation of V-shaped overlaps

Vadim A. Manukhin<sup>1</sup> e-mail: nikal6@mail.ru<sup>1</sup>State marine technical university of Saint-Petersburg

**Abstract.** The article provides a brief description and comparison of two approximate methods for taking into account the dead-rise angle of V-shaped overlaps when calculating their strength and stiffness. In both methods, the dead-rise angle is taken into account by introducing additional rigidity of the Central longitudinal beam, while the overlap itself is considered as flat. The difference between the methods is a different approach to assessing the additional stiffness of the central beam and taking into account the dependence of the additional stiffness on the dead-rise angle angle, the ratio of the overlap size, and the presence of a emphasis of the longitudinal edges of the overlap. Calculations using both methods are compared with the "reference" solution obtained by the finite element method. For the simplest V-shaped floor with a single longitudinal central beam, the influence of the dead-rise angle and the spacer of the longitudinal edges of the floor on the results of calculations is studied. It is shown that both approximate approaches give generally reliable estimates of the overlap deflection and the stress state in the middle of the central beam span, but they significantly underestimate the maximum normal stresses in the support sections of the central beam.

**Key words:** dead-rise angle, emphasis, additional stiffness, numerical modeling, local stresses, central beam.

## Введение

Перекрытия V-образной формы поперечного сечения **часто** используются в качестве днищевых перекрытий кораблей и маломерных судов. Находят они применение и в качестве перекрытий крыш ангаров и складских помещений. Проектирование и расчеты прочности и жесткости таких перекрытий имеют специфику, состоящую в учете разгружающего эффекта, вызванного килеватостью, то есть симметричным изломом поверхности перекрытия по продольной оси симметрии. За счет килеватости центральная продольная балка перекрытия (киль, коньковая балка) может иметь меньшее поперечное сечение и вес. Оценка прочности и жесткости таких перекрытий на ранней стадии проектирования имеет важное значение, как для обеспечения надежности самих перекрытий, так и при проектировании опорных устройств для постановки кораблей в док и при спуске на воду.

## 1. Методики расчета

В работах [1,2] показано, как может быть учтена килеватость днищевых перекрытий корабля. Отмечается, что при местном изгибе килевой балки между поперечными переборками килеватость днища приводит к сжатию в поперечном направлении и сдвигу листов днища и внутреннего дна, что

способствует увеличению жесткости перекрытия и уменьшению изгибающих моментов в килевой балке. Повышение жесткости перекрытия в [1,2] учитывается добавлением к моменту инерции киля поправки, зависящей от угла килеватости, для случаев полной заделки и свободного опирания киля в опорных сечениях. Например, в [1,2] при полной заделке киля его прогиб в вертикальной плоскости задается приближенным выражением

$$f(x) = \frac{f_0}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right), \quad (1)$$

где  $f_0$  – прогиб в середине пролета киля, имеющего длину  $L$ . При наличии угла килеватости листы обшивки днища и внутреннего дна будут сжиматься от траверзных перемещений обшивки с килем кромок равных

$$\bar{u}(x) = -f(x) \sin \alpha. \quad (2)$$

Потенциальная энергия плоского напряженно-деформированного состояния днищевых пластин обоих бортов в [1,2] приводится в следующем виде

$$V = \frac{\pi}{8} E t f_0^2 \sin^2 \alpha, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости материала,  $t$  – суммарная толщина днищевой обшивки и настила второго дна.



Формула (3) получена при аппроксимации цепных напряжений, удовлетворяющей условиям отсутствия касательных напряжений на опорном контуре листов перекрытия и быстрого убывания всех напряжений до нуля по мере удаления от киля. Также при выводе формулы (3) предполагалось, что траверзные перемещения всех кромок перекрытия не равны нулю.

Далее в [1,2] предлагается указанные пластины заменить некоторой фиктивной балкой, закрепленной аналогично килю и имеющей момент инерции  $\Delta I$  и такой же, как у киля, прогиб (1).

Потенциальная энергия изгиба такой фиктивной балки будет равна

$$V = \frac{\pi^4}{L^3} E \Delta I f_0^2 \cdot \quad (4)$$

Равенство энергий (3) и (4) приводит к формуле для поправки  $\Delta I$  в виде

$$\Delta I = \frac{tL^3}{8\pi^3} \sin^2 \alpha \cong \frac{tL^3}{250} \sin^2 \alpha \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что полученная поправка  $\Delta I$  не зависит от соотношения сторон перекрытия. Однако ясно, что такая зависимость должна иметь место. Кроме того, представляет интерес не рассмотренный в [1,2] случай закрепления траверзных перемещений кромок опорного контура.

Выполненные в [3] аналогичные расчеты днищевых пластин V-образного перекрытия методом Ритца и методом конечных элементов (МКЭ) показывают, что поправка может быть представлена в виде

$$\Delta I = \frac{tL^3}{k(\gamma)} \sin^2 \alpha \quad (6)$$

где  $k(\gamma)$  - коэффициент, зависящий от соотношения сторон перекрытия  $\gamma = 2L/B$  и от условий закрепления кромок пластин у борта;  $B$  - ширина перекрытия.

На Рис.1 показана зависимость коэффициента  $k(\gamma)$  от соотношения сторон перекрытия и от условий закрепления кромок пластин у борта.

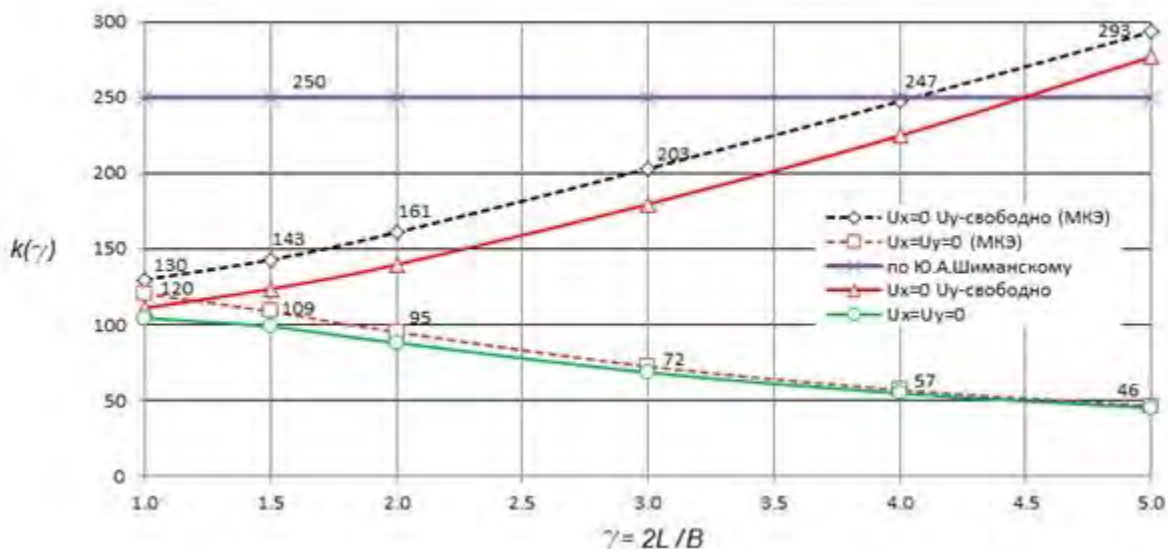


Рис.1. Значения коэффициента  $k(\gamma)$

Отметим, что в [3] расчеты выполнялись в предположении отсутствия на всех кромках листов продольных перемещений  $U_x$ , при нулевых траверзных перемещениях  $U_y$  на поперечных кромках и при заданных в соответствии с (1) перемещениях  $U_y$  на общих с килем кромках. Рассматривались два варианта задания траверзных перемещений  $U_y$  на бортовых кромках: 1-  $U_y$  свободны и 2-  $U_y$  равны нулю.

Как видно из Рис.1, для перекрытий с  $L/B < 2$  при отсутствии распора в бортовой контур положительное влияние килеватости на прочность и жесткость перекрытия в рамках принятой постановки задачи проявляется в гораздо большей степени, чем принято считать в традиционных методах расчета килеватых перекрытий. Формула Ю. А. Шиманского (5) дает близкое значение поправки к моменту инерции киля только для днищевых перекрытий с

$L/B \sim 2$  при относительно гибких бортовых перекрытиях. Вместе с тем встречаются днищевые перекрытия с большой килеватостью, у которых  $L/B < 2$ . У перекрытий с любым отношением длин сторон  $L/B$  при наличии распора в борт влияние килеватости, как видно из Рис.1, еще более существенно.

Представление прогиба киля в обеих методиках в виде (1) также приводит к погрешности в результатах оценки влияния килеватости.

## 2. Результаты расчета

Ниже приведены некоторые результаты расчета V-образных перекрытий с различной килеватостью при  $L/B=1,5$  (Рис.2).

В расчетах приняты следующие данные:  $L=7,5$  м;  $B=5,0$  м;  $t_k=0,02$  м;  $t_d=0,01$  м;  $h=0,5$  м;  $p=20$  кПа;  $E=2 \cdot 10^5$  МПа;  $\alpha=0^\circ, 6^\circ, 12^\circ$  и  $18^\circ$ . Перекрытие нагружалось приложенной к центральной балке

распределенной нагрузкой  $q=p \cdot B/2=50$  кН/м. Условия закрепления перекрытия на контуре: прогибы  $w=0$ ; продольные перемещения  $U_x=0$ ; траверзные

перемещения на поперечных сторонах контура  $U_y=0$ , на продольных –  $U_y$  свободны или  $U_y=0$ .

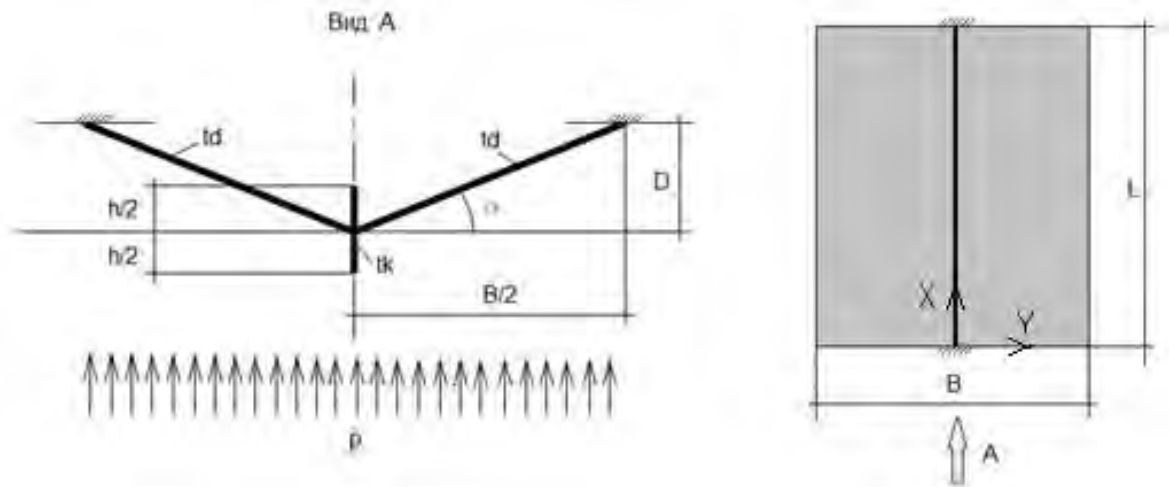


Рис.2. V-образное перекрытие

Вычислялись наибольшие нормальные напряжения в опорном ( $\sigma_o$ ) и среднем ( $\sigma_c$ ) поперечных сечениях центральной балки, а также ее прогибы ( $w$ ) в середине пролета.

На Рис.3 показаны результаты вычислений по МКЭ при килеватости перекрытия  $\alpha=18^\circ$  для свободных перемещений  $U_y$  на продольных кромках контура.

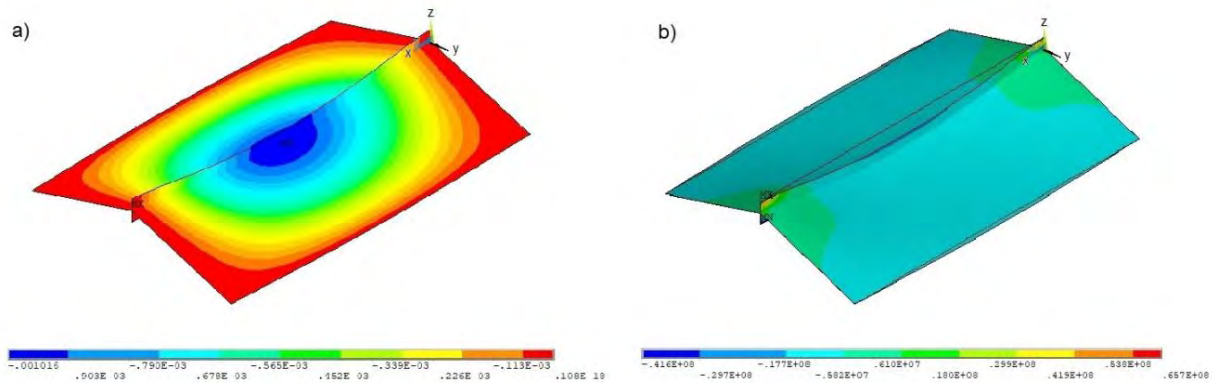


Рис.3. а) – прогибы  $w$ , м; б) – нормальные напряжения  $\sigma_x$ , Па

Аналогичные результаты получены аналитически с использованием для  $\Delta I$  формулы (5) из [1,2] и формулы (6) из [3]. В последнем случае значения коэффициента  $k(\gamma)$  находим по Рис.1 при  $\gamma=3$ . Для незакрепленных в траверзном направлении продольных кромок опорного контура получим  $k_1=203$ , для закрепленных –  $k_2=72$ .

Для аналитических расчетов использованы следующие формулы:

$$w = \frac{qL^4}{384 E(I + \Delta I)} \left( 1 + 48 \frac{EI}{G\omega L^2} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_o = \frac{qL^2}{12W} \frac{I}{I + \Delta I} \quad (8)$$

$$\sigma_c = -\frac{qL^2}{24W} \frac{I}{I + \Delta I} \quad (9)$$

где  $I$ ,  $W$  – соответственно момент инерции и минимальный момент сопротивления поперечного сечения центральной балки с присоединенным пояском обшивки  $b=L/8$ ;  $\omega = h \cdot tk$ ;  $G = E / 2,6$ .

Сравнение полученных результатов приведено на Рис.4-5.

### Заключение

Полученные результаты расчетов перекрытия с  $L/B=1,5$  и с одной продольной центральной балкой при различных углах килеватости позволяют сделать следующие выводы.

1. Рассмотренные две приближенные методики учета килеватости V-образного перекрытия приводят к достаточно надежной оценке наибольшего прогиба центральной балки в середине пролета при отсутствии распора продольных кромок. Наличие распора позволяет учесть только методика с уточненной поправкой момента инерции центральной балки. При этом

полученные по ней прогибы хорошо согласуются с численным экспериментом по МКЭ.

- Вычисляемые по обеим методикам наибольшие нормальные напряжения в среднем сечении центральной балки хорошо согласуются с численным экспериментом по МКЭ. Однако даже по методике с уточненной поправкой момента инерции центральной балки наибольшие нормальные напряжения в ее опорных сечениях оказываются существенно заниженными, как при отсутствии распора продольных кромок, так и при его наличии. Относительная погрешность возрастает по мере увеличения килеватости

перекрытия. Наиболее вероятной причиной погрешности является приближенность принятой в обеих методиках упругой линии центральной балки перекрытия.

- Закрепление траверзных перемещений на продольных сторонах опорного контура перекрытия приводит к значительному увеличению жесткости перекрытия и снижению напряжений в центральной балке. Указанное обстоятельство хорошо воспроизводится приближенной методикой с уточненной поправкой момента инерции центральной балки.

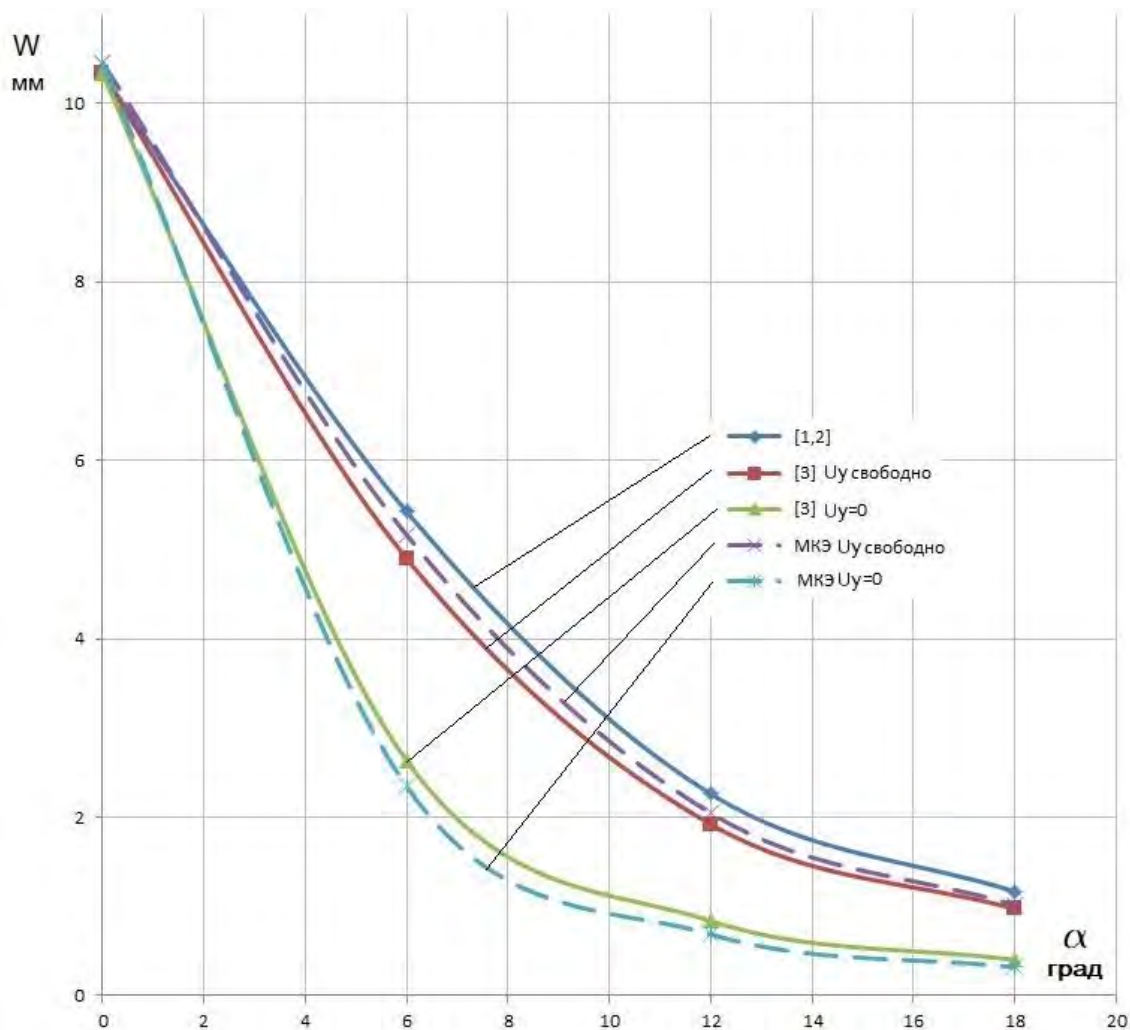


Рис.4. Прогиб центральной балки в середине пролета, мм

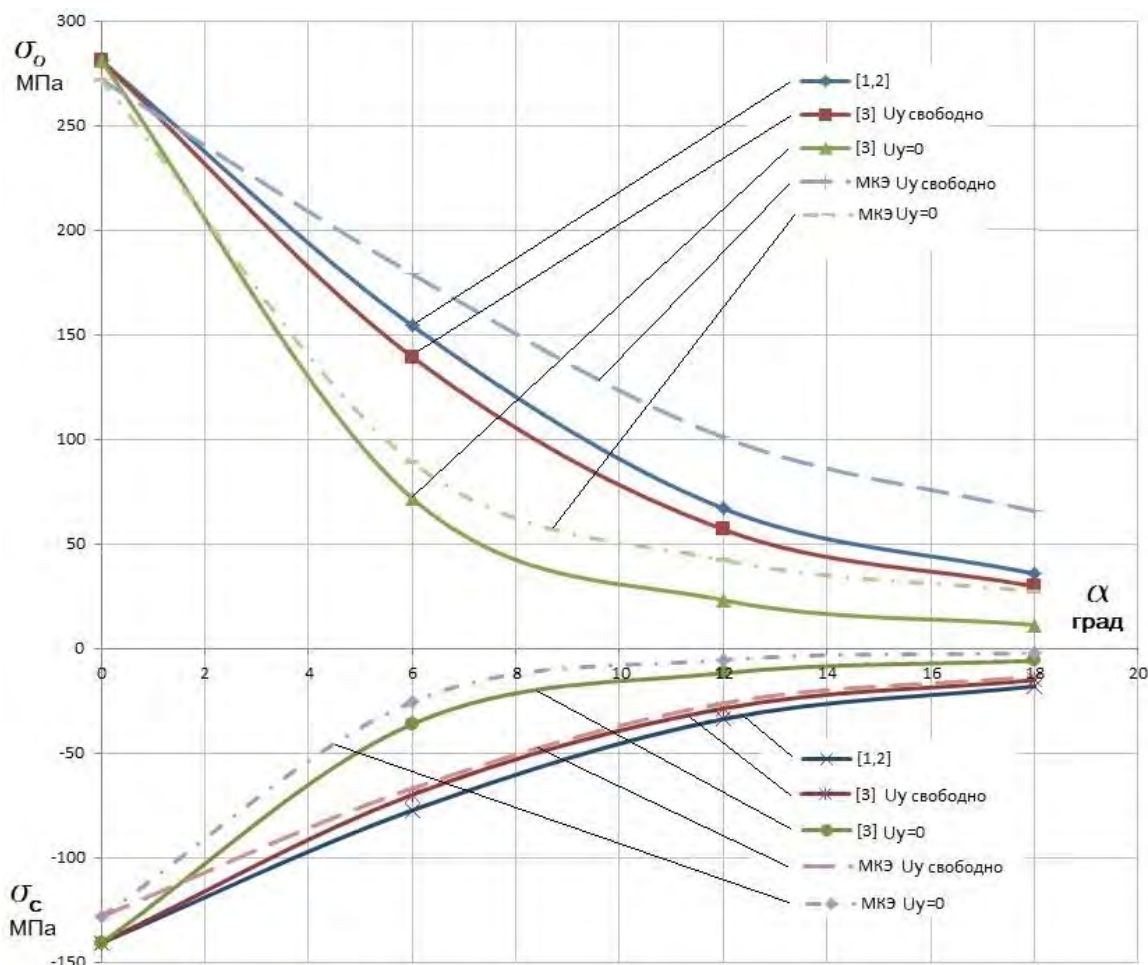


Рис.5. Нормальные напряжения в опорных и в среднем поперечных сечениях центральной балки, МПа

#### Литература

- иманский Ю.А. Расчет прочности корпуса корабля при постановке в док и при спуске на воду. М., изд. «Обorongиз», 1946, 92 с.  
 иманский Ю.А. Учет влияния килеватости днища на его прочность и жесткость. Сборник статей по судостроению. Л., изд. «Судпромгиз», 1954, с. 99-102  
 анухин В.А. О расчетах прочности и жесткости днищевое перекрытия с килеватостью. Морские интеллектуальные технологии, №2(40), Т.1, СПб, изд. «НИЦ МОРИНТЕХ», 2018, с.57-61

#### References

1. Shimansky Y.A. Raschet prochnosti korpusa korablya pri postanovke v dok i pri spuske na vodu [Calculation of the strength of the ship's hull during docking and launching]. M., izd. «Oborongiz», 1946, 92 s.
2. Shimansky Y.A. Uchet vlijania kilevatosti dnisha na ego prochnost i gestkost [Accounting for the effect of bottom with dead-rise angle on its strength and stiffness]. Sbornik statej po sudostroeniju. L., izd. «Sudpromgiz», 1954, s. 99-102
3. Manuhin V.A. O raschetah prochnosti i gestkosti dnishevogo perekrytija s kilevatostju [About calculations of the strength and stiffness of the bottom overlaps with dead-rise angle]. Morskije intellektualnye tehnologii. №2(40), T.1, SPb, izd. «NIC MORINTEH», 2018, s. 57-61

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

**Вадим Анатольевич Манухин**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [nikal6@mail.ru](mailto:nikal6@mail.ru)

**Vadim A. Manukhin**, Ph.D. (Eng), Associate professor, Associate professor of Department of ship structural mechanics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: [nikal6@mail.ru](mailto:nikal6@mail.ru)

Поступила в редакцию: 14.11.2020  
 Принята к публикации: 12.01.2021



УДК 629.12.073.243.4

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.021

## Определение коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при совместной качке двух судов на мелководье параллельно вертикальной стенке

**В.Ю. Семенова**<sup>1</sup> e-mail: sem\_viktoria@mail.ru, **К.И. Баканов**<sup>1</sup> e-mail: kirill.bakanov@mail.ru  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

**Аннотация.** В статье рассматривается определение коэффициентов демпфирования и присоединенных масс, возникающих при совместной качке двух судов в условиях мелководья параллельно вертикальной стенке на основании решения трехмерной потенциальной задачи. Определение гидродинамических коэффициентов осуществляется на основании методов интегральных уравнений и зеркальных отображений. Представленное решение в отечественной практике является новым. В статье приводятся результаты расчетов коэффициентов присоединенных масс и демпфирования, возникающих при качке двух одинаковых судов, расположенных лагом к волнению и параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний как между судами, так и между судами и вертикальной стенкой. Проводится исследование влияния различных фарватеров на величины гидродинамических коэффициентов, а именно: мелководного фарватера, мелководного фарватера с вертикальной стенкой, мелководного фарватера со вторым параллельно качающимся судном и мелководного фарватера с вертикальной стенкой и вторым судном. Таким образом, в работе учитывается одновременное влияние мелководья, вертикальной стенки и второго судна. Показано увеличение значений коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при уменьшении расстояний между судами и между судами и вертикальной стенкой. Также показано значительное совместное влияние вертикальной стенки и второго судна на коэффициенты присоединенных масс и демпфирования по сравнению с другими видами стесненных фарватеров.

**Ключевые слова:** метод интегральных уравнений, функция Грина, коэффициенты присоединенных масс и демпфирования мелководье, совместная качка, трехмерная потенциальная задача, гидродинамическое взаимодействие

## Determination of the added masses and damping coefficients during coupled motions of two ships in shallow water parallel to the vertical wall

**Viktoriya Yu. Semenova**<sup>1</sup> e-mail: sem\_viktoria@mail.ru, **Kirill I. Bakanov**<sup>1</sup> e-mail: kirill.bakanov@mail.ru  
<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article discusses the determination of damping coefficients and added masses arising from the joint motions of two ships in shallow water conditions parallel to the vertical wall based on the solution of a three-dimensional potential problem. Determination of hydrodynamic coefficients is carried out on the basis of the methods of integral equations and mirror images. The solution presented in the national practice is new. The article presents the results of calculating the coefficients of added masses and damping arising from the motions of two identical ships located lagged to the sea and parallel to the vertical wall, depending on the change in the distances between the ships and between the ships and the vertical wall. A study is being made of the influence of various waterways on the values of hydrodynamic coefficients, namely: a shallow waterway, a shallow waterway with a vertical wall, a shallow waterway with a second parallel oscillating ship and a shallow waterway with a vertical wall and a second ship. Thus, the work takes into account the simultaneous influence of shallow water, vertical wall and the second ship. An increase in the values of the coefficients of added masses and damping with a decrease in the distances between ships and between ships and the vertical wall is shown. It also shows a significant combined effect of the vertical wall and the second ship on the added mass and damping coefficients in comparison with other types of constrained waterways.

**Keywords:** method of the integral equations, Green function damping coefficients and added masses, shallow water, the coupled motions of ship, three dimensional potential problem, hydrodynamic interaction.

### Введение

В работах Тан Хтун Аунг, Со Мое Аунг, Аунг Мью Тхант и Семеновой В.Ю. [1], [2], [3] были разработаны численные методы и апробированы программы расчета качки судна на мелководье, параллельно вертикальной стенке и совместной качки двух судов на мелководье. В работах проведено исследование влияния изменения относительной глубины [1], расстояния между судном и вертикальной стенкой [2] и расстоянием между судами [3] на коэффициенты присоединенных масс и демпфирования. Показано значительное совместное влияние изменения относительной глубины и расстояния между судном и вертикальной стенкой, а также расстояния между судами на перечисленные характеристики. В данных работах было порознь исследовано влияние

вертикальной стенки и наличия второго судна на гидродинамические коэффициенты. В работе Lim [5] исследована совместная качка танкера и плавучего понтона параллельно вертикальной стенке и приведены результаты расчетов гидродинамических коэффициентов для фиксированных расстояний между объектами. Исследования влияния изменения расстояний на величины данных характеристик не проводилось.

В настоящей работе решается задача о совместном влиянии на судно вертикальной стенки и параллельно качающегося второго судна на мелководье, производится оценка данного совместного влияния на величины коэффициентов присоединенных масс и демпфирования и исследование изменения расстояний между судами и между судами и стенкой на их значения.

**Описание метода**

В соответствии с линейной теорией качки судна, потенциалы скорости движения жидкости судна А и судна В при качке параллельно вертикальной стенке  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$  можно представить в виде следующей суперпозиции [7]:

$$\Phi_A = \varphi_{0A}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_{7AA}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_{7BA}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \sum_{j=1}^6 U_{jA} \varphi_{jAA} + \sum_{j=1}^6 U_{jB} \varphi_{jBA}, \quad (1)$$

$$\Phi_B = \varphi_{0B}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_{7BB}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_{7AB}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \sum_{j=1}^6 U_{jB} \varphi_{jBB} + \sum_{j=1}^6 U_{jA} \varphi_{jAB},$$

где  $U_{jA}, U_{jB}$  - скорости отдельных видов качки судна А и судна В,  $\varphi_{0A}, \varphi_{0B}$  - потенциалы набегающего волнения, действующего на судно А и судно В соответственно:

$$\varphi_{0A} = -i \frac{g}{\omega} \zeta_w \frac{\cosh \mu_0(\zeta_A + h)}{\cosh \mu_0 h} e^{i\mu_0(\xi_A \cos \beta + \eta_A \sin \beta)}; \quad \varphi_{0B} = -i \frac{g}{\omega} \zeta_w \frac{\cosh \mu_0(\zeta_B + h)}{\cosh \mu_0 h} e^{i\mu_0(\xi_B \cos \beta + \eta_B \sin \beta)} \quad (2)$$

Потенциалы  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$  должны удовлетворять уравнению Лапласа, граничным условиям на свободной, смоченной поверхностях, на вертикальной стенке и на дне водоема. Граничные условия на смоченных поверхностях для каждого из потенциалов, входящих в выражения (1) и (2), имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_{jAA}}{\partial n} &= n_{jA} + i \frac{U}{\omega_K} m_{jA}; & \frac{\partial \varphi_{jBA}}{\partial n} &= 0; \\ \frac{\partial \varphi_{jAB}}{\partial n} &= 0; & \frac{\partial \varphi_{jBB}}{\partial n} &= n_{jB} + i \frac{U}{\omega_K} m_{jB} \quad j = 1, 2, \dots, 6 \\ \frac{\partial \varphi_{7AA}}{\partial n} &= -\frac{\partial \varphi_{0A}}{\partial n}; & \frac{\partial \varphi_{7BA}}{\partial n} &= 0; \\ \frac{\partial \varphi_{7AB}}{\partial n} &= 0; & \frac{\partial \varphi_{7BB}}{\partial n} &= -\frac{\partial \varphi_{0B}}{\partial n}, \end{aligned} \quad (3)$$

Граничные условия непротекания  $n_{jA}, n_{jB}$  имеют общий вид:

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos(n, \xi); n_2 = \cos(n, \eta); n_3 = (n, \zeta); \\ n_4 &= \eta \cos(n, \zeta) - \zeta \cos(n, \eta); n_5 = \zeta \cos(n, \xi) - \xi \cos(n, \zeta); \\ n_6 &= \xi \cos(n, \eta) - \eta \cos(n, \xi) \\ m_j &= 0, \quad j = 1, 2, 3, 4 \\ m_5 &= n_3; \\ m_6 &= -n_2 \end{aligned} \quad (4)$$

и должны выполняться соответственно на смоченной поверхности судна А и судна В.

Граничные условия на вертикальной стенке будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_A}{\partial \eta} &= 0, & \eta &\rightarrow H_q; \\ \frac{\partial \Phi_B}{\partial \eta} &= 0, & \eta &\rightarrow H_q \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения коэффициентов присоединенных масс и демпфирования задача сводится к определению потенциалов  $\varphi_{jAA}, \varphi_{jBA}, \varphi_{jAB}, \varphi_{jBB}$ , обусловленных отдельными видами качки и гидродинамическим взаимодействием судов между собой и вертикальной стенкой.

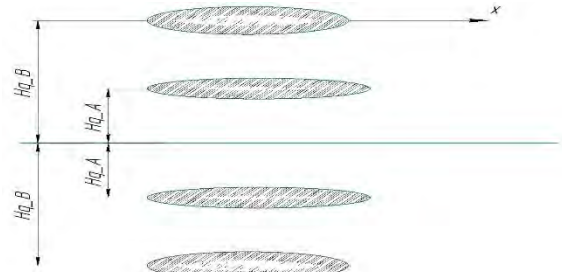


Рис.1 К методу зеркальных отображений

Для ее решения используется теорема Грина и метод зеркальных отображений (рис.1) [2], [6] согласно которой каждый из искомых потенциалов можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi_{jAA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA1}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) (G_{AA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + G_{AAq}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, 2H_{qA} - \eta_{1A}, \zeta_{1A})) dS_A + \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB1}(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) (G_{BA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) + G_{BAq}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1B}, \zeta_{1B})) dS_B; \\ \varphi_{jAB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA1}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) (G_{AB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + G_{ABq}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1A}, \zeta_{1A})) dS_A + \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB1}(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) (G_{BB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) + G_{BBq}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}, 2H_{qB} - \eta_{1B}, \zeta_{1B})) dS_B; \\ \varphi_{jBA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA2}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) (G_{AA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + G_{AAq}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, 2H_{qA} - \eta_{1A}, \zeta_{1A})) dS_A + \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB2}(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) (G_{BA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) + G_{BAq}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1B}, \zeta_{1B})) dS_B; \\ \varphi_{jBB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA2}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) (G_{AB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + G_{ABq}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1A}, \zeta_{1A})) dS_A + \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB2}(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) (G_{BB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) + G_{BBq}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}, 2H_{qB} - \eta_{1B}, \zeta_{1B})) dS_B, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $G_{AA}, G_{AB}, G_{BA}, G_{BB}$  - функции Грина для пространственных пульсирующих источников,

расположенных в точках с координатами  $(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A})$  и  $(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B})$  соответственно,  $G_{AAq}, G_{ABq}, G_{BAq}, G_{BBq}$  - функции Грина, полученные в результате применения метода зеркального отображения. Именно за счет данных составляющих учитывается влияние вертикальной стенки.

Выражение для функции Грина может быть представлено согласно John в виде бесконечных рядов [4], [8]:

$$G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = 2\pi \frac{(v^2 - \mu_0^2) \cosh \mu_0(\zeta + h) \cosh \mu_0(\zeta_1 + h)}{(\mu_0^2 - v^2)h + v} \quad (7)$$

$$(Y_0(\mu_0 R) - iJ_0(\mu_0 R)) + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + v^2) \cos \mu_k(\zeta + h) \cos \mu_k(\zeta_1 + h)}{(\mu_k^2 + v^2)h - v} K_0(\mu_k R),$$

где  $\mu_k$  - положительные корни уравнения

$$\mu_k \tan \mu_k h + v = 0$$

Неизвестные интенсивности потенциалов определяются из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sigma_{jA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A) + \frac{1}{4\pi S_A} \iint_{S_A} \sigma_{jA}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \left( \frac{\partial G_{AA}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{AAq}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, 2H_{qA} - \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \right) dS_A + \\ & + \frac{1}{4\pi S_B} \iint_{S_B} \sigma_{jB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) \left( \frac{\partial G_{BA}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_B, \eta_B, \zeta_B) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{BAq}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_B, \eta_B, \zeta_B, H_{qA} + H_{qB} - \eta_B, \zeta_B) \right) dS_B = n_{jA}; \\ & -\frac{1}{2} \sigma_{jB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) + \frac{1}{4\pi S_A} \iint_{S_A} \sigma_{jA}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \left( \frac{\partial G_{AB}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{ABq}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \right) dS_A + \\ & + \frac{1}{4\pi S_B} \iint_{S_B} \sigma_{jB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) \left( \frac{\partial G_{BB}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_B, \eta_B, \zeta_B) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{BBq}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_B, \eta_B, \zeta_B, 2H_{qB} - \eta_B, \zeta_B) \right) dS_B = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sigma_{jA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A) + \frac{1}{4\pi S_A} \iint_{S_A} \sigma_{jA}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \left( \frac{\partial G_{AA}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{AAq}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, 2H_{qA} - \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \right) dS_A + \\ & + \frac{1}{4\pi S_B} \iint_{S_B} \sigma_{jB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) \left( \frac{\partial G_{BA}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_B, \eta_B, \zeta_B) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{BAq}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_B, \eta_B, \zeta_B, H_{qA} + H_{qB} - \eta_B, \zeta_B) \right) dS_B = 0; \\ & -\frac{1}{2} \sigma_{jB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) + \frac{1}{4\pi S_A} \iint_{S_A} \sigma_{jA}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \left( \frac{\partial G_{AB}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{ABq}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \right) dS_A + \\ & + \frac{1}{4\pi S_B} \iint_{S_B} \sigma_{jB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) \left( \frac{\partial G_{BB}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_B, \eta_B, \zeta_B) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{BBq}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_B, \eta_B, \zeta_B, 2H_{qB} - \eta_B, \zeta_B) \right) dS_B = n_{jB}. \end{aligned}$$

Коэффициенты присоединенных масс и демпфирования определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \lambda_{ijAA} &= \rho \iint_{S_A} (-\operatorname{Re} \varphi_{jAA} - \frac{U}{\omega_K} \frac{\partial}{\partial \xi} \operatorname{Im} \varphi_{jAA}) n_j dS_A; \\ \mu_{ijAA} &= \rho \iint_{S_A} (-\omega_K \operatorname{Im} \varphi_{jAA} - U \frac{\partial}{\partial \xi} \operatorname{Re} \varphi_{jAA}) n_j dS_A; \\ \lambda_{ijBA} &= \rho \iint_{S_A} (-\operatorname{Re} \varphi_{jBA} - \frac{U}{\omega_K} \frac{\partial}{\partial \xi} \operatorname{Im} \varphi_{jBA}) n_j dS_A; \\ \mu_{ijBA} &= \rho \iint_{S_A} (-\omega_K \operatorname{Im} \varphi_{jBA} - U \frac{\partial}{\partial \xi} \operatorname{Re} \varphi_{jBA}) n_j dS_A; \\ \lambda_{ijBB} &= \rho \iint_{S_B} (-\operatorname{Re} \varphi_{jBB} - \frac{U}{\omega_K} \frac{\partial}{\partial \xi} \operatorname{Im} \varphi_{jBB}) n_j dS_B; \\ \mu_{ijBB} &= \rho \iint_{S_B} (-\omega_K \operatorname{Im} \varphi_{jBB} - U \frac{\partial}{\partial \xi} \operatorname{Re} \varphi_{jBB}) n_j dS_B; \\ \lambda_{ijAB} &= \rho \iint_{S_B} (-\operatorname{Re} \varphi_{jAB} - \frac{U}{\omega_K} \frac{\partial}{\partial \xi} \operatorname{Im} \varphi_{jAB}) n_j dS_B; \\ \mu_{ijAB} &= \rho \iint_{S_B} (-\omega_K \operatorname{Im} \varphi_{jAB} - U \frac{\partial}{\partial \xi} \operatorname{Re} \varphi_{jAB}) n_j dS_B, \end{aligned} \quad (9)$$

### Анализ результатов

На основании изложенного метода была разработана программа расчета совместной качки двух судов на мелководье параллельно вертикальной стенке. В таблице 1 приведены основные характеристики судов, для которых проводились расчеты коэффициентов присоединенных масс и демпфирования.

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
Танкер "Баскунчак"	74	12.0	4.65	0.71	0.8
Балкер "Капитан Панфилов"	134	20.6	9.4	0.78	0.88
Лесовоз "Николай Новиков"	140	21	8.68	0.74	0.83

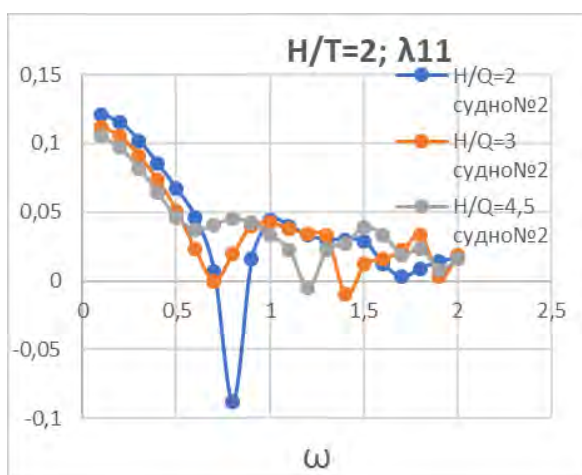


Рис. 2. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{11}$ , возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

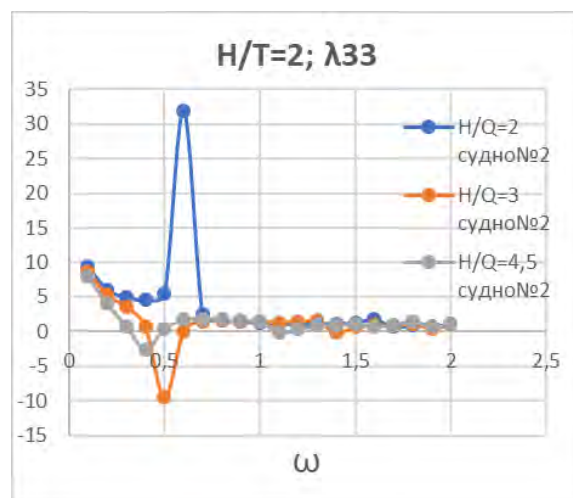


Рис. 4. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{33}$ , возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

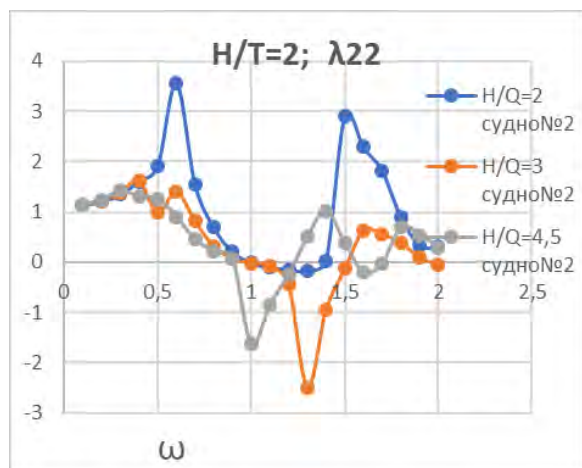


Рис. 3. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{22}$ , возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

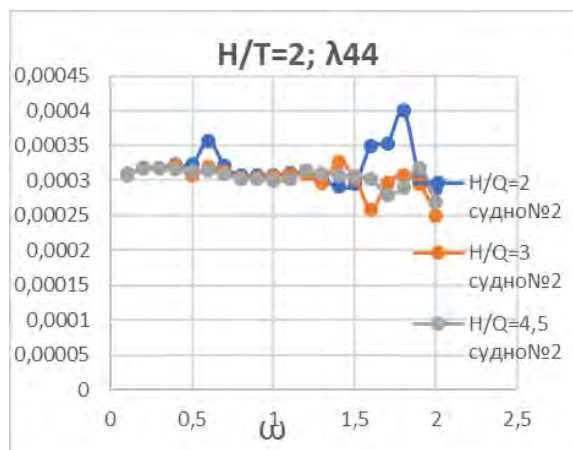


Рис. 5. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{44}$ , возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами



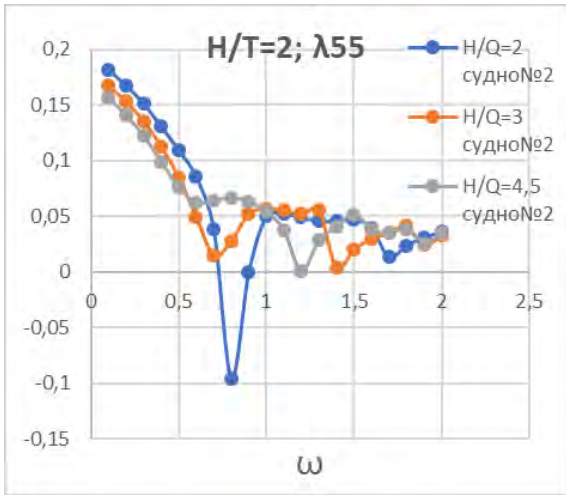


Рис. 6. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{55}$ , возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

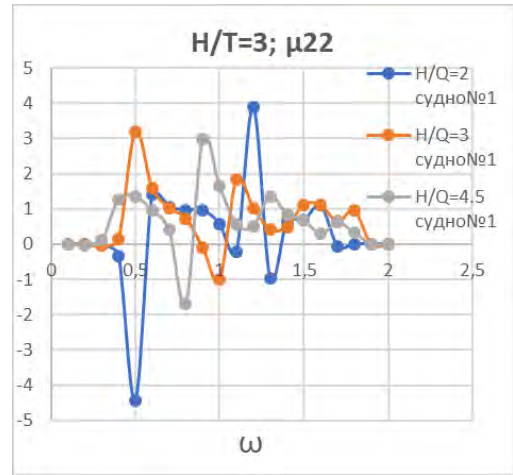


Рис. 9. Коэффициенты демпфирования  $\mu_{22}$ , возникающие при качке двух судов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

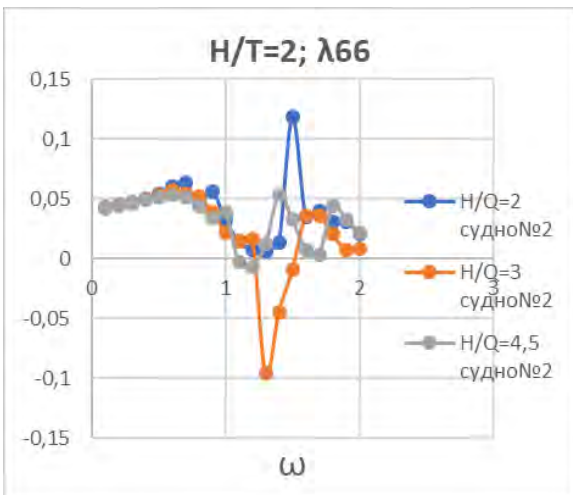


Рис. 7. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{66}$ , возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

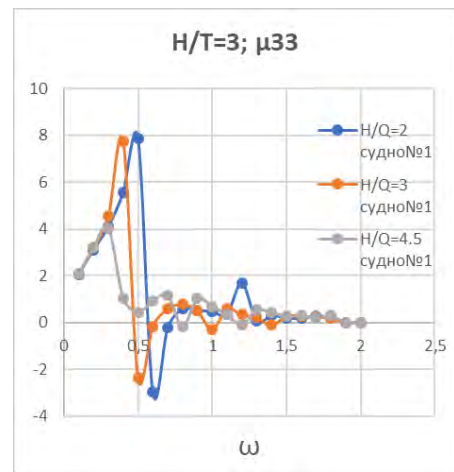


Рис. 10. Коэффициенты демпфирования  $\mu_{33}$ , возникающие при качке двух судов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

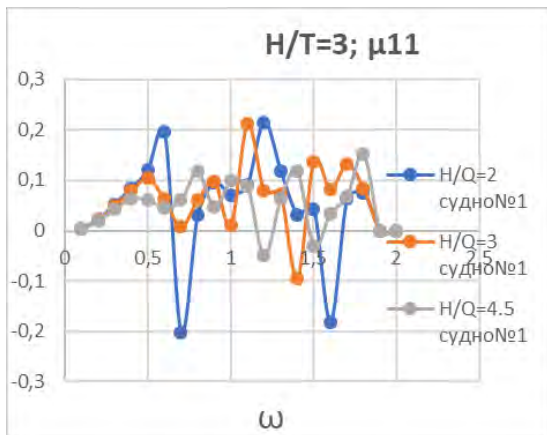


Рис. 8. Коэффициенты демпфирования  $\mu_{11}$ , возникающие при качке двух судов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

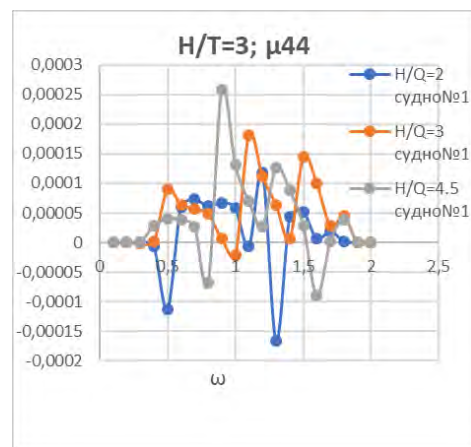


Рис. 11. Коэффициенты демпфирования  $\mu_{44}$ , возникающие при качке двух судов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

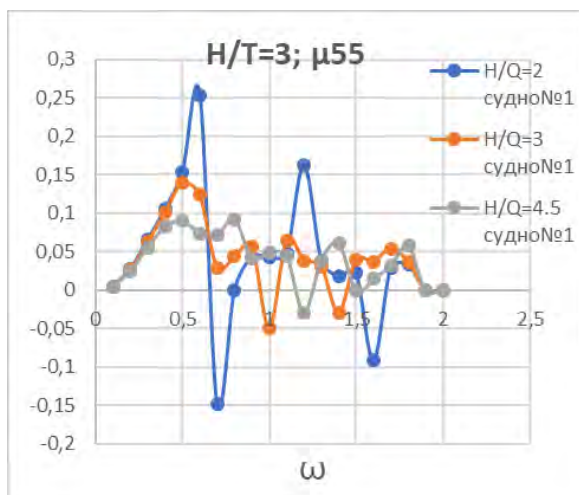


Рис. 12. Коэффициенты демпфирования  $\mu_{55}$ , возникающие при качке двух судов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

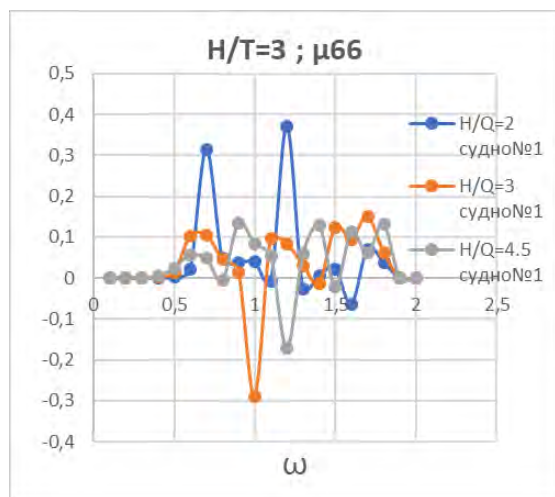


Рис. 13. Коэффициенты демпфирования  $\mu_{66}$ , возникающие при качке двух судов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами

На рис.2-13 представлены результаты расчетов коэффициентов присоединенных масс и демпфирования, имеющих место при совместной качке двух одинаковых судов параллельно вертикальной стенке. При выполнении расчетов учитывалось совместное влияние изменения относительных расстояний между судами и стенкой  $Hq/B/2$  и между самими судами  $D/B/2$ . При этом расчеты проводились при равенстве относительных расстояний до стенки и между судами  $Hq/B/2=D/B/2=H/Q$  и различных значений относительной глубины  $H/T$ .

Анализ полученных результатов расчетов коэффициентов присоединенных масс показывает наличие характерных «пиков» зависимостей данных

коэффициентов от частоты, а также отрицательных значений присоединенных масс. Появление отрицательных значений связано не с недостатками метода, а с проявлением гидродинамического взаимодействия между самими судами и вертикальной стенкой. Наибольшие значения в области «пиков» имеют коэффициенты присоединенных масс при сочетании наименьших относительных расстояний между судами и между судами и стенкой (рис.2-7). Так, значение безразмерной присоединенной массы  $\lambda_{33}$  на частоте  $\omega=0,6$  при  $H/Q=2$  в 16 раз больше, чем при  $H/Q=4.5$  (рис.4), а значение  $\lambda_{55}$  на частоте  $\omega=0,8$  и  $H/Q=2$  в 3 раза больше соответствующего значения при  $H/Q=3$  (рис. 6). При совместном влиянии изменения расстояний между судами и судами и вертикальной стенкой характерно некоторое смещение максимальных значений присоединенных масс в область высоких частот (рис.2,3,6). Отмеченный сдвиг имеет место и в случае качки судна параллельно вертикальной стенке, и в случае качки двух судов на мелководье.

На рис.8-13 приведены результаты расчетов основных коэффициентов демпфирования, возникающих при совместной качке двух лесовозов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке. Для данных коэффициентов также характерно наличие многочисленных «пиков» зависимостей и отрицательные значения. Также как и присоединенные массы, коэффициенты демпфирования в большинстве случаев возрастают при совместном уменьшении расстояний между судами и судами и вертикальной стенкой (рис.8-13). Так, значение коэффициента  $\mu_{33}$  на частоте  $\omega=0.5$  при  $H/Q=2$  в 8 раз больше соответствующего значения при  $H/Q=4.5$  (рис.10), а значение коэффициента  $\mu_{66}$  на частоте  $\omega=0.7$  при  $H/Q=2$  в 6 раз больше значения  $\mu_{66}$  при  $H/Q=4.5$  (рис.13). Для коэффициентов демпфирования также характерен сдвиг максимальных значений в область высоких частот. Так, максимальное значение коэффициента  $\mu_{33}$  при  $H/Q=2$  имеет место на частоте  $\omega=0.5$ , при  $H/Q=3$  на частоте  $\omega=0.4$  и при  $H/Q=4.5$  на частоте  $\omega=0.3$  (рис.10). Похожим образом ведут себя и остальные коэффициенты.

На рис.14-19 представлены результаты расчетов коэффициентов присоединенных масс, выполненных для различных стесненных фарватеров, а именно:

1. При качке судна на мелководье [ 1];
2. При качке судна на мелководье параллельно вертикальной стенке [ 2 ];
3. При качке двух судов на мелководье [ 3 ];
4. При качке двух судов на мелководье параллельно вертикальной стенке.

Приведенные зависимости показывают, что влияние стенки на судно, судна на судно и совместное влияние стенки и второго судна приводят к наличию «пиков» зависимостей коэффициентов присоединенных масс от частоты. Зависимости коэффициентов, полученные при качке судна на мелководье представляют собой гладкие кривые и не имеют пиков.

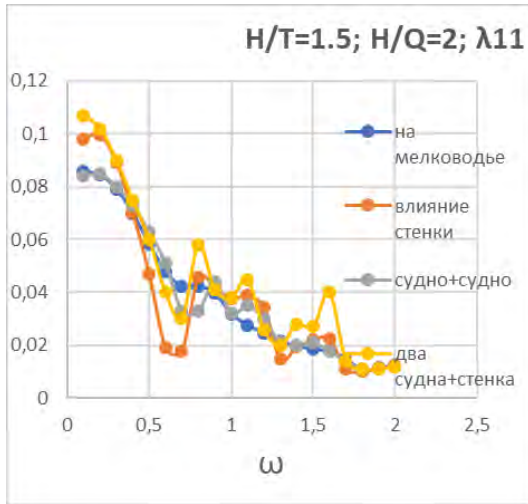


Рис. 14. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{11}$ , возникающие при качке судна «Капитан Панфилов» в различных стесненных фарватерах.

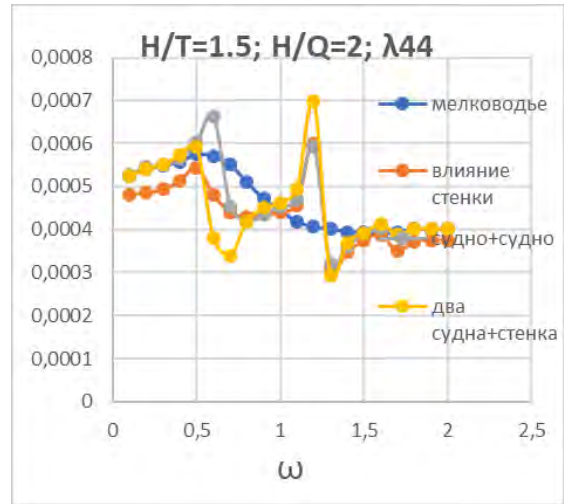


Рис. 17. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{44}$ , возникающие при качке судна «Капитан Панфилов» в различных стесненных фарватерах.

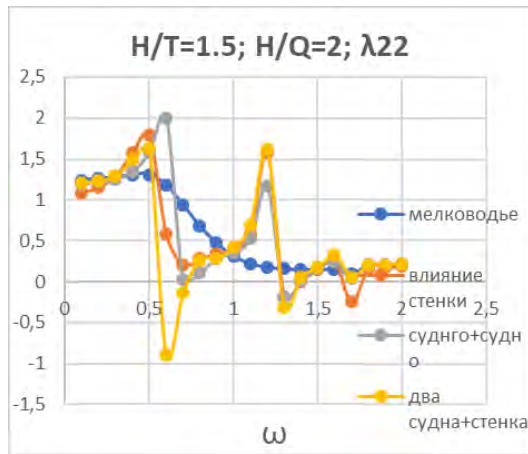


Рис. 15. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{22}$ , возникающие при качке судна «Капитан Панфилов» в различных стесненных фарватерах.

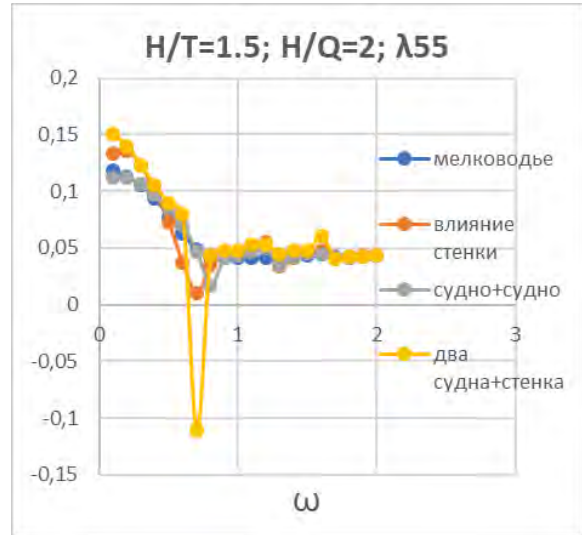


Рис. 18. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{55}$ , возникающие при качке судна «Капитан Панфилов» в различных стесненных фарватерах.

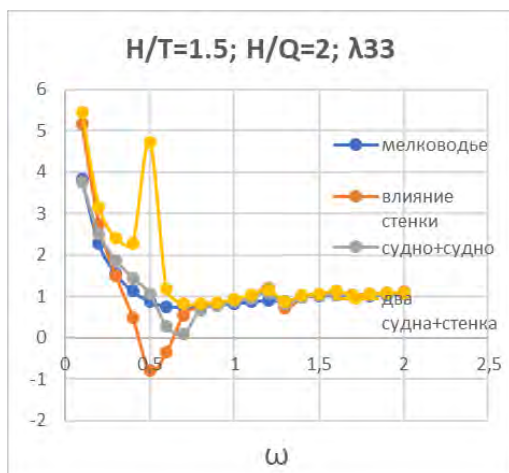


Рис. 16. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{33}$ , возникающие при качке судна «Капитан Панфилов» в различных стесненных фарватерах.

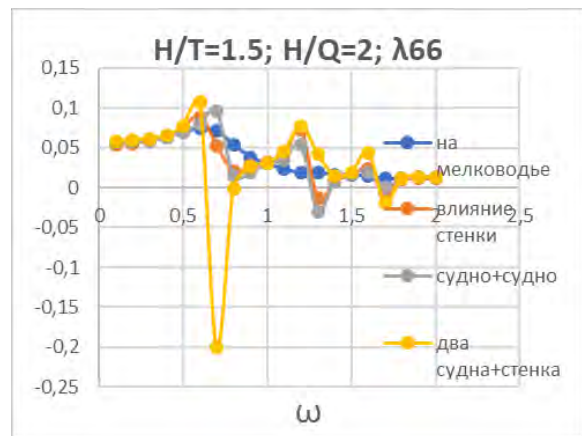


Рис. 19. Коэффициенты присоединенных масс  $\lambda_{66}$ , возникающие при качке судна «Капитан Панфилов» в различных стесненных фарватерах.



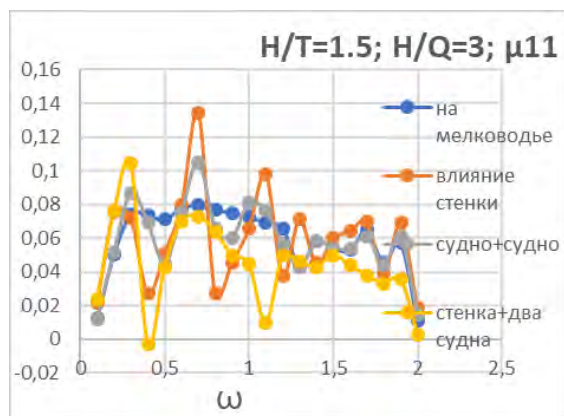


Рис. 20 Коэффициенты демпфирования  $\mu_{11}$ , возникающие при качке судна «Алексей Косыгин» в различных стесненных фарватерах.

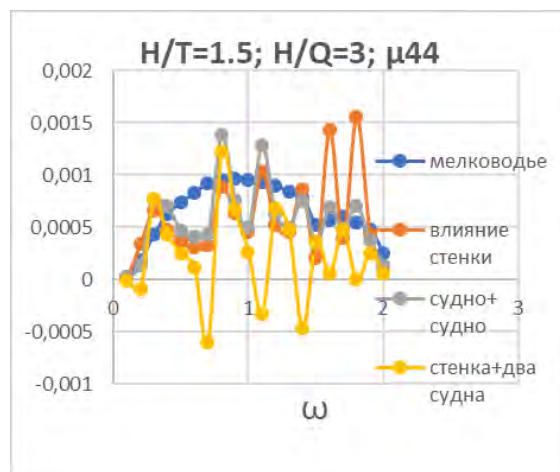


Рис. 23 Коэффициенты демпфирования  $\mu_{44}$ , возникающие при качке судна «Алексей Косыгин» в различных стесненных фарватерах.

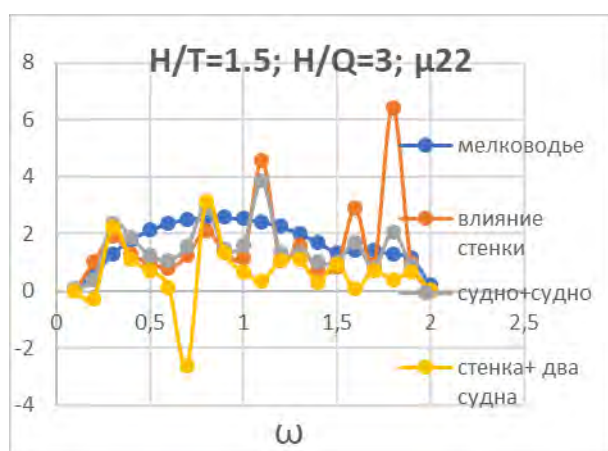


Рис. 21 Коэффициенты демпфирования  $\mu_{22}$ , возникающие при качке судна «Алексей Косыгин» в различных стесненных фарватерах

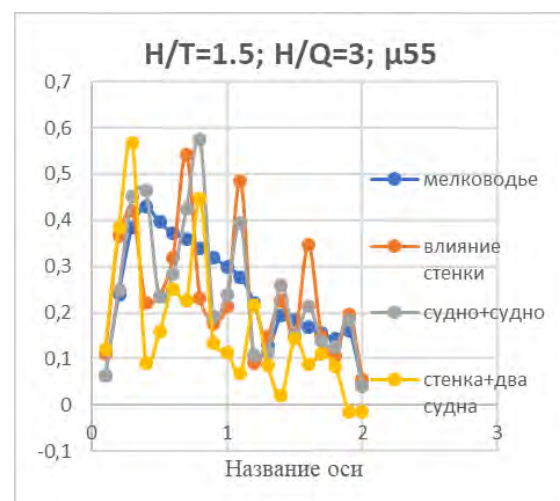


Рис. 24 Коэффициенты демпфирования  $\mu_{55}$ , возникающие при качке судна «Алексей Косыгин» в различных стесненных фарватерах

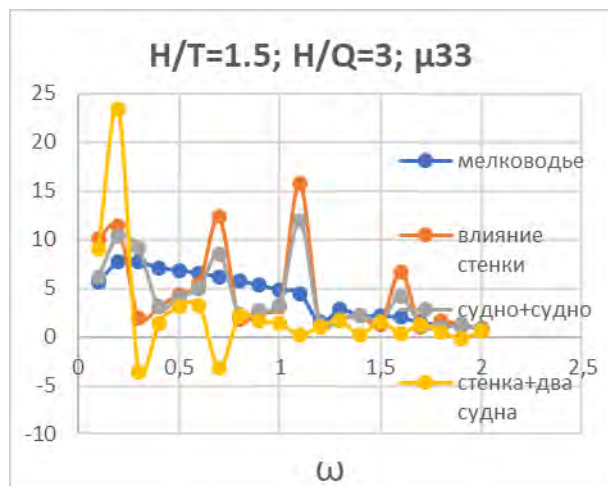


Рис. 22 Коэффициенты демпфирования  $\mu_{33}$ , возникающие при качке судна «Алексей Косыгин» в различных стесненных фарватерах

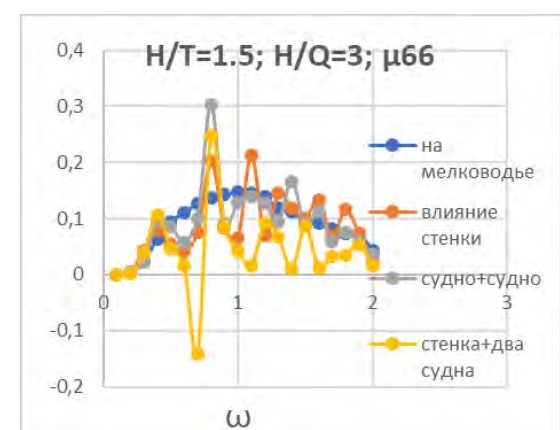


Рис. 25 Коэффициенты демпфирования  $\mu_{66}$ , возникающие при качке судна «Алексей Косыгин» в различных стесненных фарватерах



Максимальные значения по абсолютной величине коэффициенты присоединенных масс имеют место при совместном гидродинамическом взаимодействии двух судов и вертикальной стенки (рис.15,16). Так, совместное воздействие стенки и судна приводит к трехкратному увеличению на частоте  $\omega=0.7$  коэффициента присоединенной массы  $\lambda_{55}$  по сравнению с  $\lambda_{55}$  для случая качки на мелководье (рис.18) и четырехкратному увеличению присоединенной массы  $\lambda_{66}$  (рис.19)

В области высоких частот  $\omega > 1.7$ , коэффициенты присоединенных масс, полученные для различных фарватеров практически совпадают между собой. Так, для коэффициентов  $\lambda_{33}$  и  $\lambda_{55}$  влияние вертикальной стенки, второго судна и совместное влияние стенки и второго судна проявляется только в области частот  $0.2 < \omega < 0.8$  (рис.16,18).

На рис.20-25 приведены результаты расчетов коэффициентов демпфирования, вычисленных для тех же случаев фарватеров. Для зависимостей коэффициентов демпфирования характерно также наличие нескольких «пиков», обусловленных влиянием стенки, второго судна и совместного влияния стенки и второго судна. При этом местоположение этих «пиков» совпадает (рис.20-25).

Результаты расчетов показывают, что влияние стенки и влияние второго судна порознь при одинаковых расстояниях  $H_q/B/2$  и  $D/B/2$  может приводить к практически одинаковым значениям

коэффициентов. В зависимости от изменения частот данные коэффициенты могут быть меньше или больше соответствующих коэффициентов, полученных для случая мелководного фарватера. Совместное влияние вертикальной стенки и второго судна приводит к значительному изменению коэффициентов по сравнению с тремя предыдущими случаями. В области «пиков» значения коэффициентов демпфирования могут принимать как большие, так и меньшие значения по сравнению с отдельным влиянием вертикальной стенки или второго судна (рис.20-25). Также, в большинстве случаев, наблюдается смена знака на противоположный.

### Заключение

Проведенные расчеты коэффициентов присоединенных масс и демпфирования, возникающих при качке двух судов параллельно вертикальной стенке показали значительное влияние совместного изменения расстояний между судами и судами и вертикальной стенкой и необходимость его учета.

В дальнейшем разработанный метод может быть использован для расчетов возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик различных видов совместной качки.

### Литература

1. Семенова В.Ю. Тан Хтун Аунг О влиянии мелководья на значения присоединенных масс и коэффициентов демпфирования судна. Морские интеллектуальные технологии N1, 2011, стр.10-14
2. Семенова В.Ю., Со Мое Аунг Исследование влияния вертикальной стенки на гидродинамические характеристики судна при его качке на мелководье Морские интеллектуальные технологии N 3(17), 2012, стр.41-45
3. Семенова В.Ю., Аунг Мьо Тхант . Определение гидродинамических коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при совместной качке двух судов. Морские интеллектуальные технологии, N4(30), т.1,2015, стр.9-15
4. John F. On the motion of floating bodies. Comm.Pure and Appl. Math., 1950, v. 3, p. 45-101.
5. Lim S.H. Global performance analysis of a floating harbor and a container ship for loading and offloading operations. Thesis, Texas University,2007.
6. Oortmerssen G. The motions of a ship in shallow water. Ocean Engineering, 1976, vol.3, n4
7. Oortmerssen G. Hydrodynamic interaction between two structures, floating in waves. Proc. 2 nd Int.conf on the behavior of off-shore structures, London,1979, pp.339-356
8. Wehausen J.V., Laitone E.V. Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, 1960, v.9, p.446-778

### References

1. Semenova V.Yu. Tan Khtun Aung (2011) O vliyaniy melkovod'ya na znacheniya prisoedinennykh mass i koeffitsientov dempfirovaniya sudna. [ About the influence of shallow water on the values of the added masses and damping coefficients of the ship] Morskie intellektual'nye tekhnologii N1, str.10-14
2. Semenova V.Yu., So Moe Aung (2012) Issledovanie vliyaniya vertikal'noy stenki na gidrodinamicheskie kharakteristiki sudna pri ego kachke na melkovod'e [ The investigation of the effects of vertical quay wall on the hydrodynamics characteristics of the ship oscillating in shallow water] Morskie intellektual'nye tekhnologii N 3(17), str.41-45
3. .Semenova V.Yu., Aung M'o Tkhant (2015) . Opredeleniegidrodinamicheskikhkoeffitsientovprisoedinennykh mass I dempfirovaniyaprisovmestnoykachkedvukhsudov [The determination of hydrodynamics coefficients of added masses and damping during the joint motions of two ships in waves]. Morskieintellektual'nyetekhnologii, N4(30), t.1, str.9-15
4. John F.(1950) On the motion of floating bodies. Comm.Pure and Appl. Math., v. 3, p. 45-101.
5. Lim S.H.(2007) Global performance analysis of a floating harbor and a container ship for loading and offloading operations . Thesis, Texas University.
6. Oortmerssen G. (1976) The motions of a ship in shallow water. Ocean Engineering, vol.3, n4

7. Oortmerssen G. (1979) Hydrodynamic interaction between two structures, floating in waves. Proc. 2 nd Int.conf on the behavior of off-shore structures, London, pp.339-356
8. Wehausen J.V., Laitone E.V. (1960) Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, v.9, p.446-778

**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. Лотманская, 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

**Кирилл Игоревич Баканов**, Студент (Магистр), Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 10, e-mail: kirill.bakanov@mail.ru

**Kirill I. Bakanov**, Student (Master), State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: kirill.bakanov@mail.ru

Поступила в редакцию: 11.12.2020  
Принята к публикации: 12.02.2021

УДК 629.5.017.2

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.022

## Исследование влияния размерности математической модели движения судна на результат прогнозирования его управляемости

В.В. Багринцев<sup>1</sup> e-mail: bagrincev-victor@mail.ru, В.В. Макарова<sup>1</sup> e-mail: mvv-220294@mail.ru,  
Ю.П. Потехин<sup>1</sup> e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru

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

**Аннотация.** В работе рассматривается влияние размерности математической модели движения судна на параметры движения, характеризующие его управляемость, к которым относятся курсовой угол, угловая скорость рыскания, продольное и боковое смещение. Указанное влияние определяется путем имитационного моделирования движения судна посредством математической модели плоского движения в плоскости невозмущенной поверхности воды, модели бокового и пространственного движения. Тестовым маневром является полная циркуляция судна на тихой воде и волнении различной балльности. В качестве опорного результата принимается картина движения, доставляемая пространственной моделью, как наиболее отвечающая условиям реального плавания. В результате тестирования 6 судов различных классов установлено, что соотношение между результатами прогнозирования поворотливости посредством моделей различной размерности существенно зависит от гидродинамических характеристик объекта исследования.

**Ключевые слова:** математическая модель движения, прогнозирование управляемости судна, циркуляция судна, поворотливость на волнении, потеря управляемости.

## Investigation of the influence of the dimensionality of the mathematical model of the ship's motion the result of predicting its controllability

Viktor V. Bagrintsev<sup>1</sup> e-mail: bagrincev-victor@mail.ru,

Valentina V. Makarova<sup>1</sup> e-mail: mvv-220294@mail.ru, Yuri P. Potekhin<sup>1</sup> e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru

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

**Abstract.** The paper considers the influence of the dimension of the mathematical model of the ship's motion on the motion parameters characterizing its controllability, which include the heading angle, angular yaw rate, longitudinal and lateral displacement. This influence is determined by simulating the movement of the vessel using a mathematical model of plane movement in the plane of the undisturbed water surface, a model of lateral and spatial movement. The test maneuver this is the full circulation of the vessel in smooth water and on the varying conditions wave. The picture of movement, delivered by the spatial model, is taken as a reference result, as the most measure up for the conditions of real swimming. As a result of testing 6 vessels of various classes, it was found that the relationship between the results of predicting turnability by means of models of different dimensions significantly depends on the hydrodynamic characteristics of the research object.

**Key words:** mathematical model of movement, predicting turnability of ships, ship circulation, turnability on a waves, loss of controllability.

### Введение

Опыт эксплуатации и анализ динамики плавания надводных водоизмещающих судов [1 – 5] показывает, что незначительные вариации посадки судна (осадки, дифферента, крена) вызывают ощутимые изменения кинематических параметров его движения. Это обстоятельство указывает на необходимость оценки влияния посадки на ходовые и маневренные качества судна.

При изучении ходкости эта проблема принимается во внимание и решается сравнительно просто в связи с тем, что изучение ходовых качеств и в лабораторных исследованиях, и в натурных испытаниях реализуется в условиях прямолинейного установившегося движения судна. Исключением в некоторой степени является определение дополнительного сопротивления на волнении. Однако и в этом случае, в конечном счете, имеет место процесс установившихся колебаний судна в продольной плоскости. Таким образом, плоское установившееся движение позволяет установить прямую однозначную связь статической или динамической (ходовой) посадки с сопротивлением движению и скоростью хода.

Иная ситуация имеет место при изучении управляемости водоизмещающего судна.

Принципиальное отличие состоит в том, что для оценки поворотливости необходимо рассматривать криволинейное движение. Исторически принятым путем изучения поворотливости является анализ плоского движения судна вдоль невозмущенной поверхности воды. Крен отсутствует, что обеспечивает использование очень полезного условия симметрии корпуса относительно диаметральной плоскости.

Этот подход вполне оправдан тем, что для его реализации необходим вполне ограниченный набор гидродинамических характеристик, которые могут быть определены теоретически или опытным путем при вполне очевидных и эффективных упрощающих допущениях и начальных условиях. На его основе разработан инструментарий оценки управляемости судов, начиная с самых ранних стадий проектирования при естественном дефиците исходных данных. Он также является базовым для формирования критериев управляемости, используемых классификационными обществами.

Вместе с тем, совершенно очевидно, что допущения, заложенные в указанный подход, имеют пределы применимости, что убедительно подтверждается практикой эксплуатации судов. Указанные пределы во многом связаны с архитектурой корпусов и эффективностью

средств управления движением. Однако, если, например, в ходкости методы приближенной оценки сопротивления имеют градацию по соотношению главных размерений и коэффициентам полноты объектов, то в управляемости допущения о справедливости использования плоского движения без крена применяются ко всем водоизмещающим судам без исключения.

Нетрудно предположить, что снижение адекватности плоской модели движения судна по криволинейной траектории обусловлено отсутствием учета динамического изменения посадки в ходе маневрирования. Нужно отметить, что плоская модель позволяет учесть влияние осадки на миделе и ходового дифферента на кривизну описываемой судном траектории. На этот случай, очевидно, нужно иметь зависимости гидродинамических характеристик от указанных элементов посадки. Также очевидно, что эти самые зависимости будут отражать реальную посадку судна только до входа в циркуляцию.

Сегодня в лабораторных условиях вполне реализуема возможность определения гидродинамических характеристик моделей, буксируемых со свободными дифферентом, креном и осадкой. Ясно, что для плоской модели движения такого рода данные избыточны. В этой связи актуальным является вопрос о применении математических моделей более высокой размерности. На этом направлении динамика твердого тела предлагает модель бокового движения и, как наиболее общий вариант, пространственную модель.

Следует подчеркнуть, что в динамике полета пространственное движение летательного аппарата традиционно разделяется на продольное и боковое. Это разделение естественным образом вытекает из общей системы уравнений движения твердого тела при наличии у последнего продольной плоскости симметрии, которая у летательного аппарата присутствует при любых условиях полета в воздушной среде. У надводного водоизмещающего судна гидродинамическая симметрия погруженной части корпуса относительно диаметрали нарушается с появлением угла крена. Отметим, что модель бокового движения формально объединяет линейное перемещение в направлении нормали к диаметральной плоскости с углавыми перемещениями по курсу и крену. В динамике корабля [4] к указанным движениям добавляется продольное, что создает условия для анализа управляемости различных объектов.

Модель бокового движения отличается от модели плоского движения в горизонтальной плоскости именно возможностью учесть влияние крена [4, 6] на траекторию. В этом смысле она представляет большой интерес при исследовании поворотливости судна.

К сожалению, в динамике плавания надводного водоизмещающего судна учет пересечения корпусом свободной поверхности при посадке с креном и дифферентом всегда представлял серьезную проблему при формировании математических моделей движения. В плане обсуждаемого вопроса о боковом движении, в порядке допущения о применимости такой модели,

можно допустить, что конструктивная и инерционная симметрия собственно судна относительно диаметральной плоскости доминирует над гидродинамической инерционной симметрией.

Кроме того, следует отметить, что в условиях тихой воды и малых чисел Фруда при наличии крена сохраняется гидродинамическая симметрия дублированного корпуса относительно плоскости действующей ватерлинии. Таким образом, гидродинамическая картина плоского движения судна вдоль невозмущенной поверхности реализуется вполне корректно, если в математической модели учитывается влияние крена на боковую силу, момент зарыскивания и сопротивление движению. Можно считать, что в указанных условиях модель бокового движения является вполне применимой в задачах анализа управляемости судна.

К сожалению, в рамках модели бокового движения невозможно воспроизвести все текущие изменения посадки судна и ее влияния на кинематику процесса криволинейного движения. Такая возможность реализуется только при моделировании пространственной картины плавания [7]. Очевидно, что трудоемкость формирования пространственной математической модели для исследования управляемости судна значительно превышает затраты времени и средств, необходимые для такого исследования на базе плоского или бокового движения.

Последнее обстоятельство указывает на необходимость разумного компромисса между повышением точности результата и усложнением процесса исследования. Вместе с тем надо подчеркнуть, что в современных условиях прогнозирование крена судна на циркуляции и его обратного влияния на кривизну траектории представляют самостоятельный интерес [6]. Это однозначно свидетельствует в пользу внедрения более полных по сравнению с плоской моделью движения. Однако в части оценки основных показателей управляемости, таких, как диаметр установившейся циркуляции или статическая характеристика (диаграмма управляемости), переход на усложненные модели целесообразен в том случае, когда различные подходы к моделированию дают ощутимо отличающиеся результаты. В этой связи возникает необходимость исследования влияния размерности математической модели движения судна на основные показатели управляемости и целесообразности перехода на усложненное описание динамических процессов плавания.

#### Постановка и решение задачи

В настоящее время данные для сопоставления параметров движения судов, полученных по имитационным моделям различной размерности, практически отсутствуют. Настоящее исследование имеет целью в некоторой степени восполнить этот пробел. В рамках работы предполагается для нескольких судов различных классов рассчитать параметры движения при выполнении циркуляции на тихой воде и на волнении с использованием имитационных моделей плоского, бокового и пространственного движения. Расчеты такого рода могут быть выполнены посредством программы



кафедры теории корабля Ship Dynamic [7], позволяющей разделять пространственное движение объекта на частные виды, сохраняя при этом общую картину действующих сил и

моментов. Для решения поставленной задачи были выбраны 6 тестовых судов, характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики тестовых судов

Тип судна	Длина, м.	Ширина, м.	Осадка на миделе, м.	Количество г/д рулей	Площадь руля, кв. м.	Количество гребных винтов	Диаметр ГВ, м.	Коэффициент полноты действующей ВЛ	Коэффициент полноты мидель-шпангоута	Коэффициент общей полноты	Коэффициент продольной полноты
1 Контейнеровоз в полном грузу	203.1	25.4	5.685	1	30.3	1	6	0.65	0.90	0.55	0.61
2 Контейнеровоз в балласте	203.1	25.4	9.8	1	30.3	1	6	0.80	0.93	0.62	0.66
3 Спасательное судно	59.7	10	3.7	2	3.57	2	2	0.76	0.84	0.50	0.60
4 Быстроходное судно 60-й серии	122.6	14.2	4.58	1	15.3	2	3.52	0.66	0.75	0.40	0.53
5 Грузопассажирский паром	155.2	22	6.077	1	20	2	4	0.66	0.90	0.46	0.51
6 Малое накатное судно	56	2.3	2.07	2	1.66	2	1.05	0.74	0.74	0.44	0.60

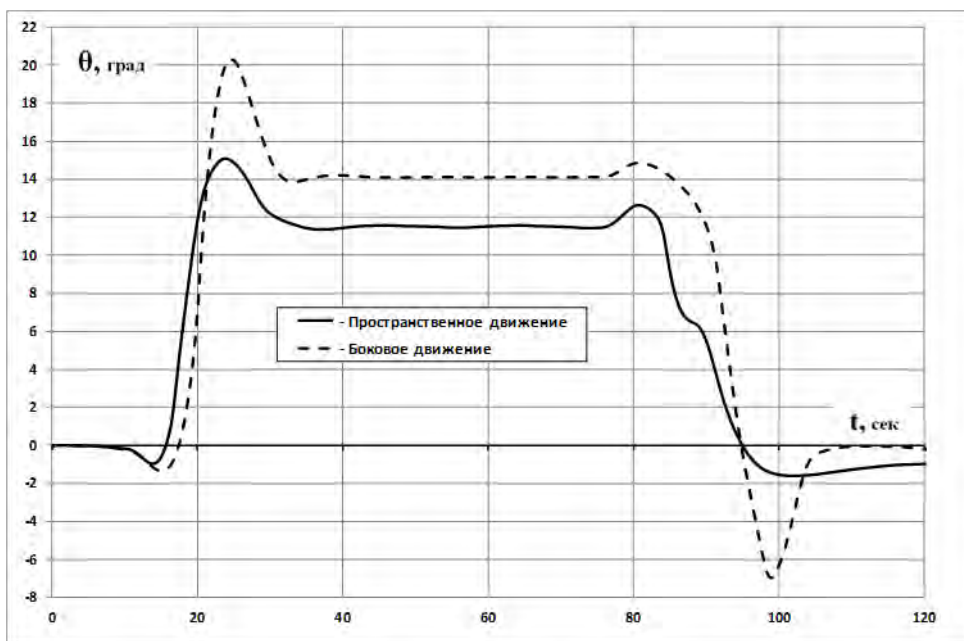


Рис. 1. Соотношение между углами крена спасательного судна при моделировании бокового и пространственного движения.

Для более отчетливого понимания влияния размерности математической модели движения на расчетные значения кинематических параметров, предварительно целесообразно сравнить соответствующие результаты моделирования для судов с существенно различающейся архитектурой корпуса, полученные на тихой воде. С этой целью было рассмотрено движение на циркуляции трех ниже перечисленных объектов.

1. Быстроходное судно 60-й серии, как пример быстроходного объекта с заостренными обводами носовой оконечности и характерной транцевой кормой.

2. Малое накатное судно (паром) смешанного плавания упрощенных обводов с большой полнотой ватерлинии, транцевой кормой и большим отношением ширины к осадке.

3. Спасательное судно с обводами, близкими к 60-той серии и кормой крейсерского типа

При оценке влияния размерности модели на элементы посадки в режиме криволинейного движения кроме плоского, бокового и пространственного движения целесообразно рассмотреть также пространственное движение без крена (случай бесконечной поперечной устойчивости). Это позволит более наглядно оценить

роль угла крена в формировании равновесной посадки на циркуляции.

Можно показать, что в условиях тихой воды для трех указанных судов модель бокового движения на циркуляции генерирует заметно больший угол крена, чем пространственная модель. Различие составляет 13, 47, 22 процента для быстроходного, накатного и спасательного соответственно. Отметим, что крен накатного судна на циркуляции составляет 1,8

градуса (по тестированию пространственного движения). Качественная картина изменения крена (рис. 1) у всех судов остается неизменной. Эти изменения крена обусловлены изменением ходовой посадки судов (осадки и дифферента) на криволинейной траектории. Можно констатировать, что модель бокового движения дает по углу крена ошибку в безопасную сторону.

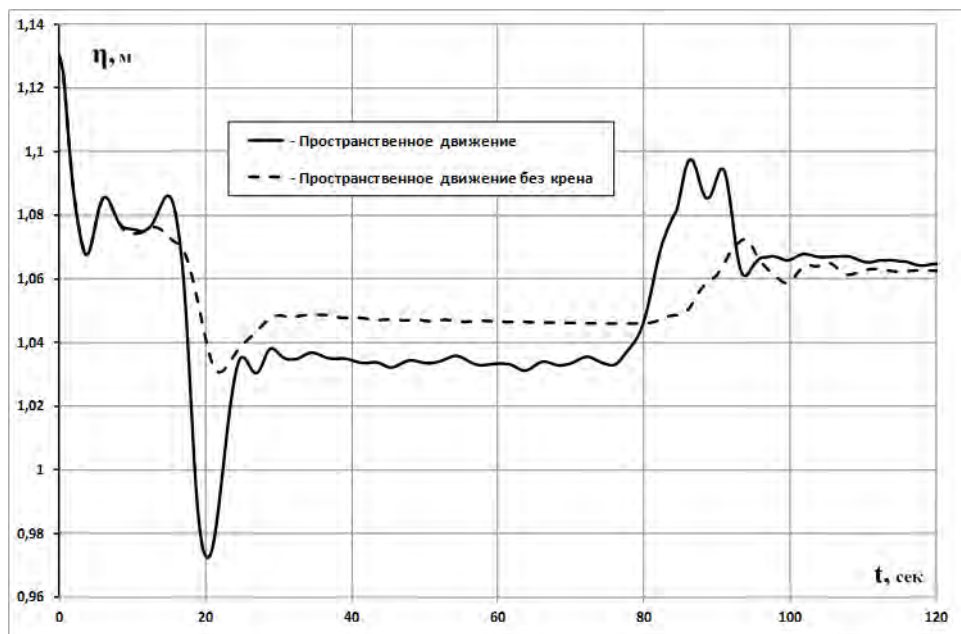


Рис. 2 Соотношение между осадками на миделе спасательного судна при моделировании полного пространственного движения и пространственного движения без крена.

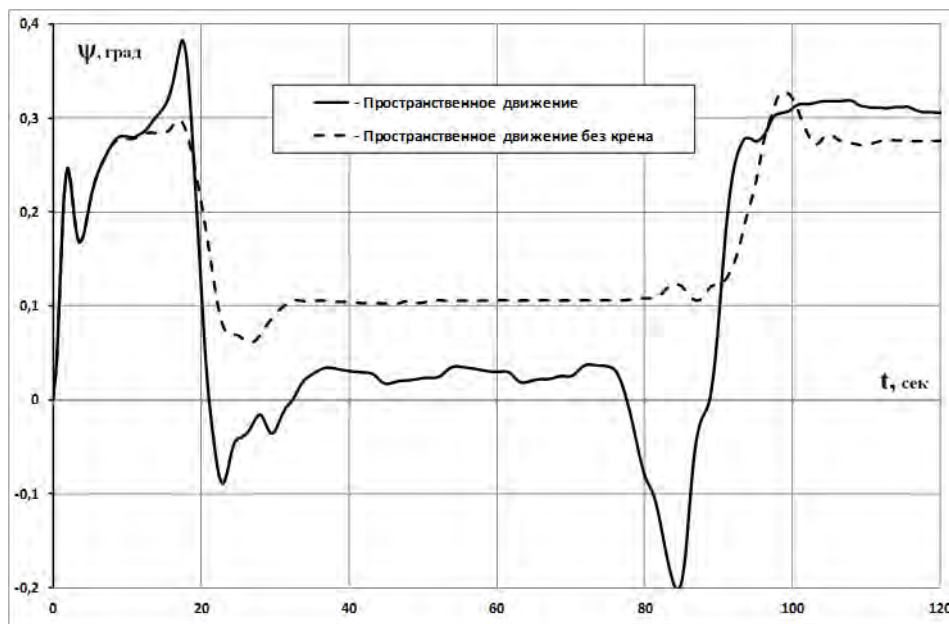


Рис. 3. Соотношение между углами дифферента спасательного судна при моделировании полного пространственного движения и пространственного движения без крена.

В свою очередь, угол крена при криволинейном движении оказывает влияние на ходовую осадку и дифферент. Характерно, что наличие крена увеличивает просадку судов на циркуляции (рис. 2).. Это, по-видимому, связано с двумя факторами: во-первых, наличие крена увеличивает разрежение на

днищевых ветвях обтекаемых с дрейфом шпангоутов, во-вторых, наличие крена требует большего погружения корпуса для гидростатической компенсации гидродинамической топящей реакции. Для трех рассматриваемых судов это влияние в

качественном и количественном отношении приблизительно одинаково.

Изменение ходового дифферента от воздействия крена значительно сильнее подчинено особенностям формы корпуса и имеет кардинально отличающиеся результаты. Если у спасательного судна это изменение имеет умеренный количественный характер (рис. 3), то быстроходное судно при отсутствии крена дифферентуется на корму (рис. 4), тогда как при его наличии имеет место дифферент на нос. Накатное и спасательное судно

при наличии и отсутствии крена незначительно дифферентуются на нос.

Дифферентовка быстроходного судна на корму при отсутствии крена обусловлена тем, что при криволинейном движении на его кормовых шпангоутах и транцевой корме вследствие косо обтекания возникают более обширные и мощные зоны разрежения, чем в носовой оконечности. В итоге топящие силы создают ощутимый дифферентующий момент на корму.

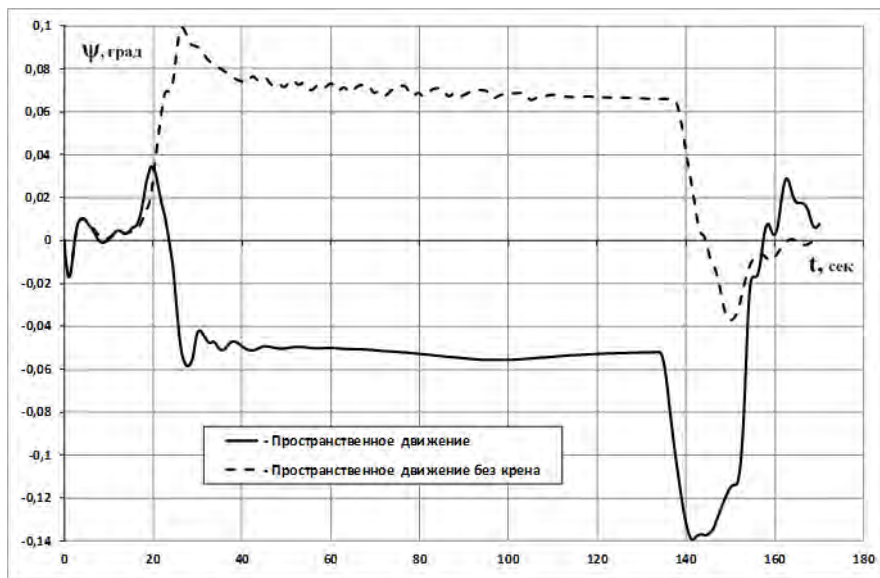


Рис. 4. Соотношение между углами дифферента быстроходного судна при моделировании полного пространственного движения и пространственного движения без крена.

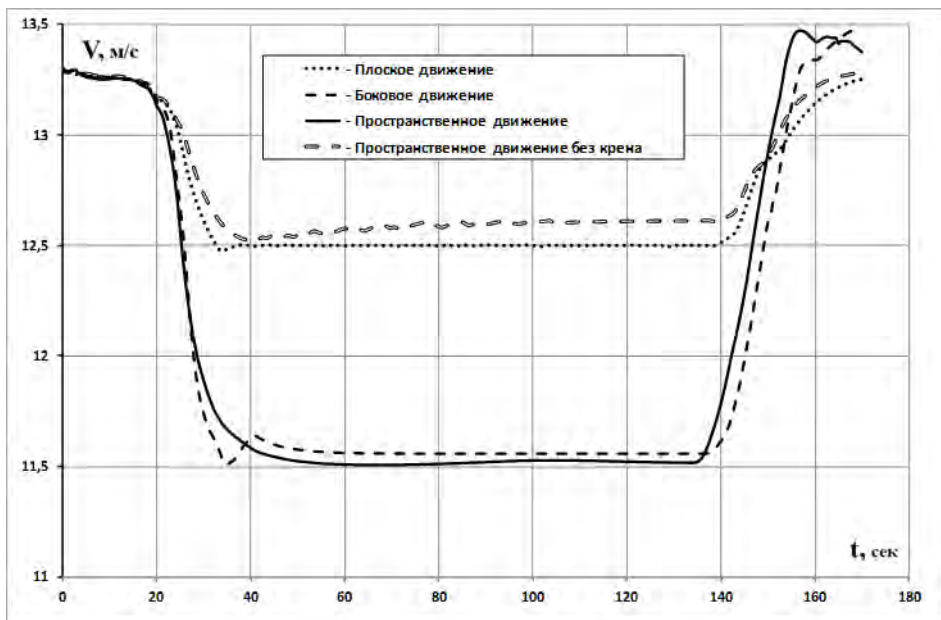


Рис. 5. Падение скорости быстроходного судна на циркуляции, полученное расчетом по математическим моделям различной размерности.

Отмеченные особенности ходовой посадки судов на циркуляции, возникающие в реальном пространственном движении, неизбежно сказываются на картине кинематических параметров, формирующих поворотливость. Этими

параметрами являются скорость хода, угловая скорость и угол дрейфа. Характерно, что угловая скорость, характеризующая скорость изменения курсового угла, для рассмотренных судов незначительно зависит от порядка математической

модели.

Как видно из графика на рис. 5, падение скорости хода быстроходного судна на циркуляции при прямой (без крена) посадке значительно меньше, чем при наличии крена. У накатного судна расчеты на основе всех используемых моделей дают практически одинаковое снижение скорости хода. У спасательного судна только расчет по пространственной модели с бесконечной поперечной остойчивостью показывает заметно меньшее падение хода в сравнении с остальными вариантами. Быстроходное и спасательное судно имеют на

циркуляции существенный угол крена. На этом основании можно заключить, что корпус с быстроходными водоизмещающими обводами дает более акцентированную гидродинамическую реакцию на асимметрию относительно диаметрали. Влияние порядка модели движения на угол дрейфа всех судов несколько сильнее, чем на угловые скорости. Причем максимальным углом дрейфа отвечает случай пространственной модели с бесконечной остойчивостью. Это также является следствием обратного влияния угла крена на кинематические параметры.

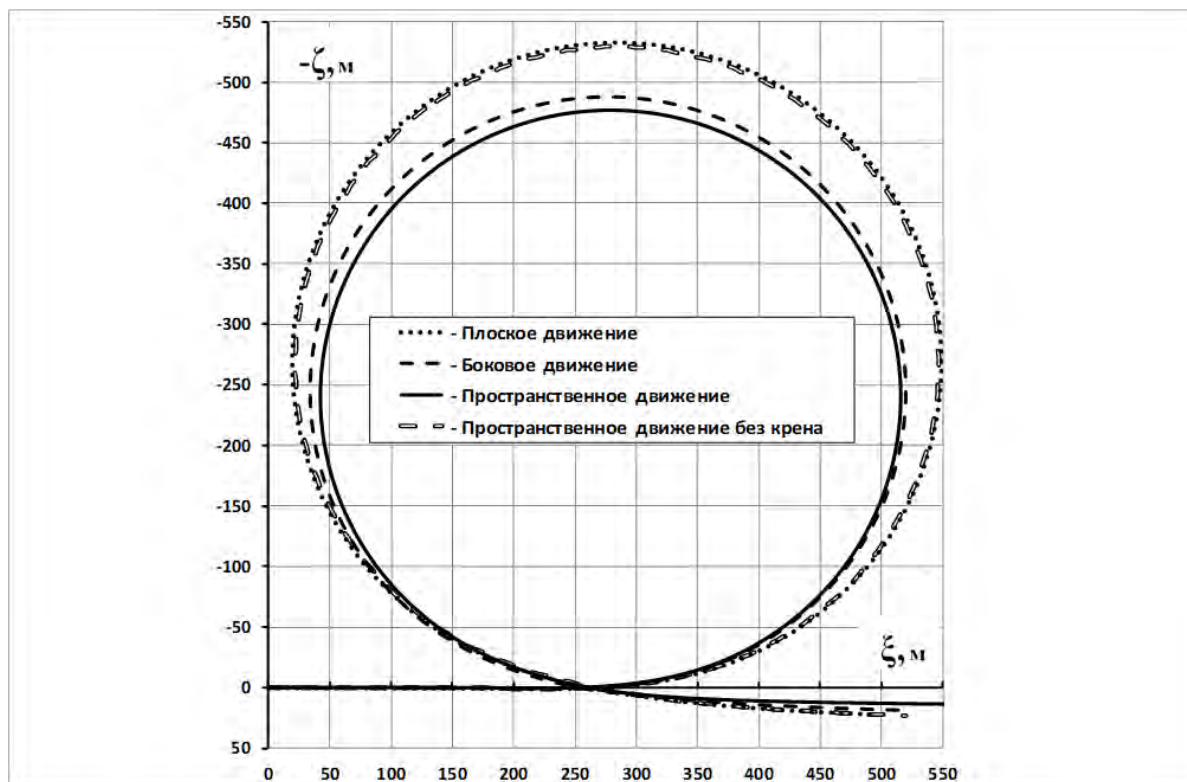


Рис. 6. Траектории движения центра масс быстроходного судна на циркуляции, полученные расчетом по математическим моделям различной размерности.

На рис. 6 представлены траектории движения центра масс быстроходного судна на циркуляции, полученные расчетом по математическим моделям различной размерности. Видно, что траектории, соответствующие прямой посадке, сепарируются в отдельную группу. Близкая картина имеет место и для спасателя. Относительное положение траекторий указывает на то, что при отсутствии крена диаметр циркуляции получается больше, чем при его наличии. Можно было бы заключить, что плоская модель движения предсказывает поворотливость с ошибкой в безопасную сторону. Но у накатного судна взаимное положение траекторий практически противоположное – отсутствие крена уменьшает диаметр циркуляции.

Подводя предварительные итоги, относящиеся к сопоставлению расчетных результатов на тихой воде, опираясь на оценки по пространственной модели в качестве эталонных, можно заключить, что использование модели бокового движения во всех случаях дает возможность повысить точность прогнозирования траектории криволинейного

движения судна на тихой воде. В зависимости от архитектуры корпуса, традиционная модель плоского движения может давать как близкие к реальности результаты, так и заметно с ней расходящиеся. Однако в большинстве рассмотренных выше случаев имеют место ошибки в безопасную сторону. Роль архитектуры корпуса на данном этапе до конца не ясна в плане рубежных обводов, при которых качественная картина влияния пространственных факторов, в частности, угла крена, принципиальным образом изменяется.

Расчёты на волнении выполнялись для скоростей 3, 6 и 18 узлов, за исключением накатного судна, для которого были приняты скорости 6 и 12 узлов. Во всех случаях рассматривалось движение на 3-х и 6-и балльном встречном (в начальный момент времени) регулярном волнении. Для 3-х балльного волнения средняя (для 3%-й обеспеченности) длина волны составляла 17 метров, при скорости ветра 8 м/с. Для 6-и балльного волнения средняя длина волны составляла 85.2 метра, при



ветре 16 м/с. Направление действия волнения и ветра совпадали. Отношение длины волны к высоте во всех случаях составляло 30.

Сопоставление отдельных кинематических параметров при маневрировании на волнении представляется нецелесообразным вследствие

сильной зашумленности результатов действующими возмущениями. Содержательным может быть только сравнение общих показателей выполненных маневров, основанных на геометрических элементах циркуляции судна.

Таблица 2

Таблица значений тактических диаметров по данным моделирования движения на волнении

Тактический диаметр										
Судно	Состояние акватории	На тихой воде			На волнении 3 балла			На волнении 6 баллов		
		6	12	18	6	12	18	6	12	18
Контейнеровоз в полном грузу	Боковое движение	883	1018	889	682	747	816	ПУ	595	797
	Плоское движение	1024	1051	1054	ПУ	798	893	ПУ	681	822
	Пространственное движение	963	1021	972	690	784	835	ПУ	690	812
Контейнеровоз в балласте	Боковое движение	748	700	657	603	646	597	ПУ	ПУ	ПУ
	Плоское движение	825	885	698	783	720	661	ПУ	612	587
	Пространственное движение	849	878	898	751	889	697	ПУ	ПУ	ПУ
Спасательное судно	Боковое движение	230	279	200	208	236	230	ПУ	244	249
	Плоское движение	221	227	220	233	256	260	ПУ	205	230
	Пространственное движение	234	254	302	231	249	257	ПУ	203	238
Быстроходное судно 60-й серии	Боковое движение	552	516	393	449	459	459	ПУ	ПУ	ПУ
	Плоское движение	530	516	514	453	477	491	ПУ	467	487
	Пространственное движение	520	508	490	452	455	460	ПУ	823	568
Грузопассажирский паром	Боковое движение	904	839	850	ПУ	596	703	ПУ	ПУ	525
	Плоское движение	744	872	819	ПУ	617	712	ПУ	ПУ	550
	Пространственное движение	867	813	684	ПУ	595	613	ПУ	ПУ	539
Малое накатное судно	Боковое движение	268	282	НВ	ПУ	299	НВ	ПУ	ПУ	НВ
	Плоское движение	295	260	НВ	193	212	НВ	ПУ	160	НВ
	Пространственное движение	246	266	НВ	ПУ	285	НВ	ПУ	ПУ	НВ

Для суждения о соотношении результатов, полученных посредством различных моделей движения, достаточно сравнить, хотя бы, данные по тактическому диаметру циркуляции. С этой целью в таблице 2 приведены значения тактических диаметров, полученных во всех вариантах моделирования движения на тихой воде и на волнении. Пометки «ПУ» в ячейках таблицы соответствуют случаям потери управляемости. Пометки «НВ» означают, что моделирование режима не выполнялось.

Сравнивая представленные величины, можно убедиться в том, что и модель бокового, и модель плоского движения для разных судов могут давать ошибки, как в безопасную, так и в опасную сторону.

Вместе с тем, с ошибкой в 20 и более процентов можно смириться на фоне того, что математическая модель прогнозирует успешное выполнение маневра, когда возникает реальная угроза потери управляемости. Представленная таблица результатов указывает на подобный факт для малого накатного судна. При скорости хода 12 узлов на волнении в 6 баллов пространственная модель и

модель бокового движения прогнозируют потерю управляемости, а плоская модель показывает успешное выполнения маневра.

### Заключение

Опираясь на накопленный опыт моделирования пространственного движения, можно утверждать, этот путь обеспечивает наиболее точное прогнозирование параметров управляемости судов и, в частности элементов циркуляции. Сложности, связанные с использованием пространственной модели движения судна, заключающиеся в повышенных требованиях к ресурсам компьютеров, в значительном увеличении процессорного времени расчетов, в многократном увеличении объема информации, необходимого для ее формирования, заставляют обращаться к традиционным подходам оценки динамики на основе модели плоского или бокового движения. Тем более, что их компактность, оперативность, и практическая эффективность не требует отдельных доказательств.

Однако столь же очевидны и недостатки усеченных математических моделей, связанные с

отсутствием учета важных факторов, связанных с переменной посадкой судна в режиме криволинейного движения, что наглядно было продемонстрировано в настоящем исследовании. При изучении управляемости судна в условиях штормового плавания наиболее опасны качественные ошибки, выражающиеся в прогнозировании сохранения управляемости в ситуациях, которые чреватые ее потерей.

Основной вывод, вытекающий из предлагаемой работы, состоит в том, что для успешного

использования существующих моделей движения необходимо накапливать информацию о возможном характере погрешностей, обусловленных их усеченной структурой и о связи масштаба ошибок с архитектурой судовых корпусов. Обобщение такой информации, возможно, позволит предложить некоторые приемлемые по сложности корректирующие структуры, способствующие повышению работоспособности существующего исследовательского инструментария.

#### Литература

1. Федяевский К. К., Соболев Г. В. Управляемость корабля. Л.: ГСИСП, 1963 – 376 с.
2. Соболев Г. В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. Л., 1976 – 477 с.
3. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном. Л.: Судостроение, 1983. 270 с.
4. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания/ Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985 – 544 с.
5. Гофман А.Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. – Л.: Судостроение, 1988 – 360 с.
6. Бурлакова Н.А. Потехин Ю.П. О влиянии угла крена на поворотливость водоизмещающих судов. Тезисы докл. на XL Крыловских чтениях, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, 2003, с. 133.
7. Потехин Ю.П. Результаты использования «распределенной» динамической модели корабля для анализа динамики подвижных объектов в различных условиях плавания. Тезисы докл. на XLII Крыловских чтениях, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, 2006.
8. Прикладные задачи динамики судов на волнении/ И.К. Бородай, В.А. Мореншильдт, Г.В. Виленский и др. – Л.: Судостроение, 1989. – 264 с.

#### References

1. Fedjaevskij K. K., Sobolev G. V. Upravljajae-most' korablja. [Controllability of ship] L.: GSISP, 1963 – 376 s.
2. Sobolev G. V. Upravljajae-most' korablja i avtomatizacija sudovozhdenija [Ship controllability and ship navigation automation]. L., 1976 – 477 s.
3. Pershic R. Ja. Upravljajae-most' i upravlenie sudnom [Controllability and control of the ship]. L.: Sudostroenie, 1983. 270 s..
4. Spravochnik po teorii korablja: V treh tomah Tom 3. Upravljajae-most' vodoizmeshhajushhih sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi principami podderzhanija [Ship Theory handbook: in three volumes. Volume 3. Controllability of displacement vessels. Hydrodynamics of vessels with dynamic maintenance principles]. Pod red. Ja.I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985 – 544 s.
5. Gofman A.D. Dvizhitel'no-rulevoj kompleks i manevrirovanie sudna. Spravochnik [Propulsion and steering system and ship maneuvering]. – L.: Sudostroenie, 1988 – 360 s.
6. Burlakova N.A. Potehin Ju.P. O vlijanii ugla krena na povorotlivost' vodoizmeshhajushhih su-dov [On the influence of the roll angle on the turnability of displacement vessels]. Tezisy dokl. na XL Krylovskih chtenijah, CNII im. akad. A.N. Krylova, SPb, 2003, s. 133.
7. Potehin Ju.P. Rezul'taty ispol'zovanija «raspredelennoj» dinamicheskoy modeli korablja dlja analiza dinamiki podvizhnyh ob#ektov v razlichnyh uslovijah plavanija [Results of using a "distributed" dynamic model of a ship to analyze the dynamics of moving objects in various sailing conditions]. Tezisy dokl. na XLII Krylovskih chtenijah, CNII im. akad. A.N. Krylova, SPb, 2006.
8. Prikladnye zadachi dinamiki sudov na vol-nenii [Applied problems of the dynamics of ships on the waves]/ I.K. Borodaj, V.A. Morenshil'dt, G.V. Vilenskij i dr. – L.: Sudostroenie, 1989. – 264 s.

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

**Виктор Викторович Багринцев**, магистр техники и технологии, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: bagrincev-victor@mail.ru

**Bagrintsev Viktor Viktorovich** master of Engineering and Technology, Saint Petersburg State Marine Technical University, 190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya Street, 10, e-mail: bagrincev-victor@mail.ru

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

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

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

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

Поступила в редакцию: 18.11.2020

Принята к публикации: 15.02.2021

УДК 629.12.001.11

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.023

## Исследование динамических наклонов судов под действием шквала в рамках условий критерия погоды

В.В. Макарова<sup>1</sup> e-mail: mvv-220294@mail.ru, Мью Тху Киав<sup>1</sup> e-mail: motuk.tec13@mail.ru,  
Ю.П. Потехин<sup>1</sup> e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru

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

**Аннотация.** Рассматривается динамический крен судов, расположенных лагом к фронту волнения, под действием порывов ветра и шквалов. Путем имитационного моделирования пространственного движения оценивается выполнение основных допущений, используемых при нормировании остойчивости в рамках критерия погоды. Показано, что первое динамическое наклонение судна на подветренный борт может быть максимальным, если длительность порыва ветра или шквала не превышает полупериода собственных бортовых колебаний. При более длительных шквалах максимальным будет второе или третье наклонение. Оценивается влияние хода судна и постоянно действующего ветра на динамический крен. Подтверждено, что для малых судов, для которых волнение высокой балльности приближается к резонансному, опасность воздействия шквального ветра наиболее велика. Результаты показывают, что, несмотря на существенную упрощающую схематизацию реальных процессов, критерий погоды является вполне эффективным средством прогнозирования безопасности штормового плавания судов.

**Ключевые слова:** критерий погоды, воздействие шквалов, бортовая качка, динамический крен, имитационное моделирование, пространственное движение.

## Investigation of the dynamic inclinations of vessels under the action squall within the conditions of the weather criterion

Valentina V. Makarova<sup>1</sup> e-mail: mvv-220294@mail.ru, Myo Thu Kiav<sup>1</sup> e-mail: motuk.tec13@mail.ru,  
Yuri P. Potekhin<sup>1</sup> e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru

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

**Abstract.** Reviewed the dynamic heel of ships disposed broadside to the wave front under the influence of wind gusts and squalls. By means of simulation of spatial motion, the fulfillment of the basic assumptions used in the normalization of stability within the framework of the weather criterion is evaluated. It is shown that the first dynamic inclination of the vessel to the leeward side can be maximal if the duration of a wind gust or squall does not exceed the half-period of natural side vibrations. With longer squalls, the second or third inclination will be maximum. The influence of the ship's course and the constantly acting wind on the dynamic heel is estimated. It has been confirmed that for small vessels, for which high-intensity waves are approaching resonance, the danger of the impact of squally wind is greatest. The results show that, despite the significant simplifying schematization of real processes, the weather criterion is a quite effective means of predicting the safety of stormy navigation of ships.

**Keywords:** weather criterion, influence of squalls, rolling motion, dynamic roll, simulation modeling, spatial movement.

### Введение

Оценка воздействия порывистого и шквального ветра на судно, плавающее в условиях волнения, считается одной из сложных задач теории качки, не получивших до настоящего времени достаточно полного решения [1, 2, 6, 7]. Современная теория качки пока не в состоянии решать подобные задачи на основе своего традиционного инструментария, соответствующего исследованию динамических систем в частотной области. Можно, по-видимому, сформировать подход, подобный тому, который предложен для анализа влияния нестационарности движения судна на бортовую качку [7], но пока этот вопрос не нашел своего приемлемого разрешения.

Вместе с тем, оценка воздействия динамически приложенной ветровой нагрузки на качающееся судно является основой для обеспечения его достаточной остойчивости с позиций безопасности плавания в штормовых условиях. Такая оценка реализуется в рамках критерия погоды на основе анализа статической и динамической остойчивости судна.

Необходимо подчеркнуть, что, в соответствии с опытом наблюдений за ветровой нагрузкой [2], существует методологическое разделение ее характера на порывы устойчиво дующего ветра и

шквалы. Средняя продолжительность порывов для сильного устойчивого ветра составляет около 2,5 с; отдельные интенсивные порывы имеют продолжительность 6 – 7 секунд и более.

Нужно учитывать, что воздействие ветровой нагрузки на судно зависит от характера его движения. Как показал С.Н. Благовещенский [2], наклонение динамически приложенной ветровой нагрузкой судна без хода оказывается значительно меньшим, чем судна на ходу. Диаграмма статической и, соответственно, динамической остойчивости судна на ходу, как показали Ю.И. Нечаев и В.Б. Образцов [2], может заметно отличаться от диаграмм остойчивости судна без хода. Это отличие может быть как в сторону повышения остойчивости, так и в сторону ее снижения.

В общепринятой расчетной схеме критерия погоды присутствует некоторая неопределенность, отмечаемая специалистами [2]. Во-первых, она предполагает, что первое наклонение судна на подветренный борт после воздействия порыва ветра будет наибольшим. В рамках обсуждаемого квазистатического подхода невозможно однозначно утверждать, что это будет именно так. По этой причине возникает вопрос о надежности оценки остойчивости по первому наклонению.



Во-вторых, расчетная схема предполагает, что аэродинамический кренящий момент включается мгновенно и действует от момента максимального наклона на наветренный борт до момента достижения соответствующего значения динамического крена на подветренном борту. Таким образом, в зависимости от значения собственных периодов свободных бортовых колебаний, время действия порыва ветра будет различным. При этом малые суда, имеющие собственные периоды в пределах 6 – 10 секунд будут, действительно, тестироваться порывами ветра, а большие, с периодами 20 – 30 секунд, будут, фактически, нормироваться уже по воздействию кратковременных шквалов. Реальные порывы ветра и швалы могут превышать по времени воздействия рамки периодов собственных колебаний. Каким образом это отразится на характере наклонений судна критерии погоды указать не в состоянии.

В-третьих, в рамках применения уравнения работ для целей нормирования поперечной остойчивости судна дискуссионным является вопрос о необходимости учета кренящего момента от постоянно дующего ветра, на фоне которого действует порыв. Кроме того, при движении лагом к волне часто имеет место статический крен, который, безусловно, оказывает влияние на картину динамического наклона судна. Статический крен и дрейф, обусловленные постоянно дующим ветром, могут быть вычислены по разработанным для этой цели методикам [2]. Однако, кроме ветрового дрейфа, имеет место также и волновой дрейф, учет которого при нормировании остойчивости в настоящее время не производится.

Наконец, движение реального судна лагом к волне неизбежно сопровождается рысканием по курсу. Это рыскание, во-первых, изменяет площадь надводной проекции судна на плоскость, нормальную к воздушному потоку. Во-вторых, рыскание возбуждает параметрическую бортовую качку, накладывающуюся на основные колебания. В-третьих, колебания угловой скорости рыскания динамически связаны с колебаниями угла дрейфа. Характеристики параметрической качки сложным образом зависят от уровня действующего волнового и ветрового возмущения, от аэродинамических характеристик судна и от качества управления его движением. В указанных обстоятельствах не может быть и речи об установившейся бортовой качке. При этом теряет определенность понятие «максимальное наклонение на наветренный борт». Безусловно, учесть все эти факторы в рамках квазистатического подхода невозможно.

Разумеется, отмеченные обстоятельства не могут служить основанием для отказа от использования обсуждаемого способа оценки и нормирования, хотя бы по той причине [2], что всякая система нормирования базируется на определенной схематизации явления, ориентированной на достаточно общие и жесткие условия.

Вместе с тем, отмеченные элементы неопределенности не могут быть оставлены без внимания. Следует подчеркнуть, что существующие рекомендации по организации штормового плавания судов [3, 6] не исключают штормования лагом к волне. При этом выработанные морской практикой рекомендации и особенности поведения судна в

режиме штормования не содержат серьезных опасений по поводу воздействия возможных швалов, порывов и ураганного ветра. Весьма возможно, что хорошая морская практика предыдущих десятилетий не предоставляла оснований для таких опасений. Между тем, события последних лет однозначно указывают как на рост количества ураганов, так и на заметное увеличение их разрушительной силы.

В связи с этим представляет интерес качественная и количественная оценка влияния факторов, сопутствующих реальным процессам плавания судов лагом к волне под воздействием порывистого и шквалистого ветра, на характер их динамического наклона в сопоставлении со схематизированной картиной, используемой при нормировании поперечной остойчивости.

### Постановка и решение задачи

Наиболее рациональным подходом к указанной проблеме представляется путь, основанный на имитационном компьютерном моделировании. Для этого требуется наличие программного обеспечения, реализующего интегрирование дифференциальных уравнений движения надводного судна с учетом всех необходимых для рассматриваемого случая категорий сил и моментов. Учитывая предварительный, оценочный характер исследования, вполне допустимо некоторое смягчение требований к количественному соответствию получаемых результатов.

Указанным требованиям вполне соответствует имеющаяся на кафедре теории корабля СПбГМТУ программа Ship Dynamic [5]. Важнейшим свойством математической модели движения, лежащей в основе рассматриваемой программы, является способность генерировать все необходимые для расчета силы и моменты, соответствующие конкретному исследуемому объекту и действующим гидрометеорологическим возмущениям.

Учитывая существо поставленной задачи, следует рассмотреть бортовую качку судов, как лежащих в дрейфе, так и при наличии хода. В методологическом плане необходимо оценить воздействие порывов ветра (шквалов) при наличии и отсутствии постоянно дующего ветра. Для определенности, направление действия ветра и швала должно совпадать с генеральным направлением бега волн.

В качестве основного варьируемого параметра необходимо рассматривать длительность действия швала. При этом нужно учитывать реакцию судна, которое под действием волнения и швала будет приводиться или уваливать под ветер так, что волнение будет уже не лаговым, а косым. Это накладывает ограничение на возможную длительность порыва или швала.

Для возможно более близкого приближения к условиям классического критерия погоды и обеспечения корректного сопоставления разных расчетных случаев движения судов, целесообразно моделировать качку на регулярном волнении в предположении о групповом характере действующих волн. Параметры регулярного волнения целесообразно задавать как средние значения, соответствующие определенной балльности по шкале ГУМС.

Выбор судов для имитационного моделирования осуществлялся исходя из наличия по ним информации. Предпочтение отдавалось судам небольшого водоизмещения, составляющим основную часть мирового флота и наиболее подверженным негативному воздействию гидрометеорологических возмущающих факторов. По указанным причинам в расчетах использовались данные по пяти следующим судам, расчетные образы которых представлены на рис. 1:

- а) контейнеровоз в балласте (рис.1а); б) контейнеровоз в полном грузу (рис.1б);

в) спасательное судно (рис.1в); г) накатно-контейнерное судно (рис.1г); д) промышленное судно (рис.1д).

Основные характеристики указанных тестовых судов представлены в Таблице 1. Для всех судов были построены диаграммы статической и динамической остойчивости с учетом влияния надстроек и палубного груза как водонепроницаемых объемов в пределах рассматриваемых скоротечных наклонов.

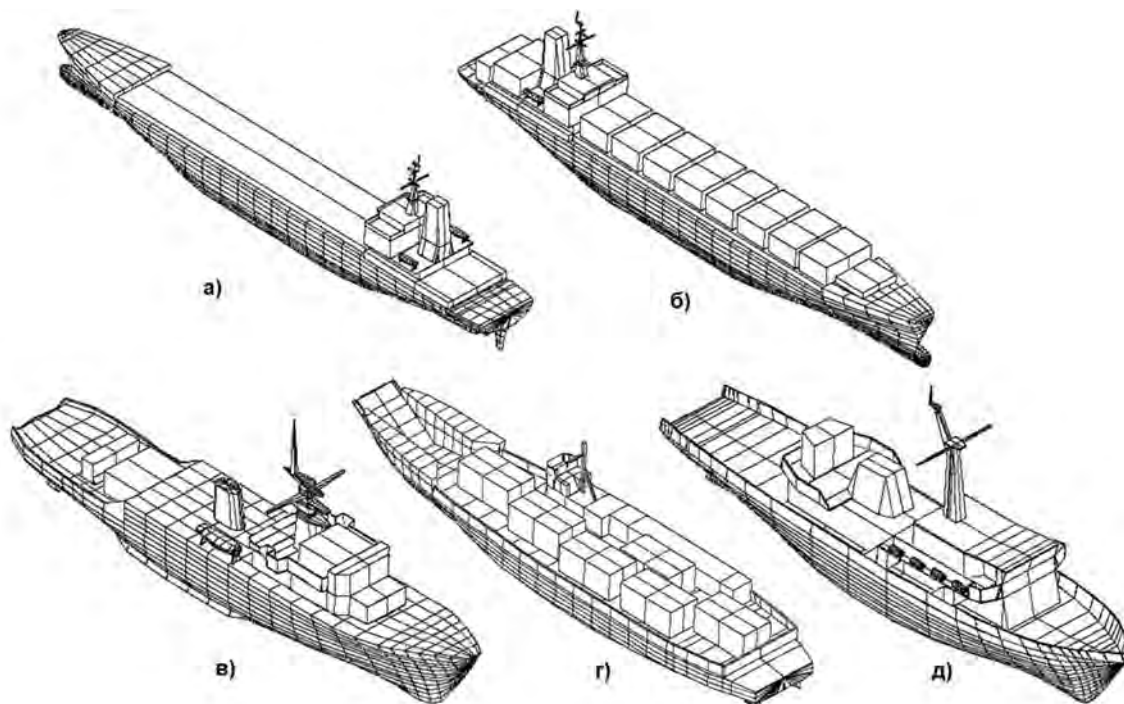


Рис. 1. Суда, выбранные для имитационного моделирования.

Таблица 1

Основные характеристики тестируемых судов

Наименование характеристики	Тестируемые суда				
	Контейнеровоз в балласте	Контейнеровоз в полном грузу	Спасательное судно	Накатное судно	Промышленное судно
Объемное водоизмещение, м <sup>3</sup>	16320	31450	870	633	300
Длина по ватерлинии, м	196,2	191,0	56,3	50,4	39,6
Ширина по ватерлинии, м	25,4	25,4	10,0	12,0	7,8
Осадка на мидель-шпангоуте, м	5,68	9,80	3,20	2,07	2,02
Коэффициент полноты площади ватерлинии	0,677	0,845	0,768	0,85	0,686
Коэффициент полноты площади мидель-шпангоута	0,94	0,944	0,81	0,944	0,848
Начальная поперечная метацентрическая высота, м	2,22	0,24	0,89	3,22	0,8

Площадь проекции погруженной части корпуса на диаметрально плоскость, м <sup>2</sup>	1063	1852	156	72,5	72,9
Отношение площади надводной части диаметральной плоскости к погруженной	2,66	1,48	2,15	4,07	3,37
Собственный период бортовых колебаний, с	16,5	47,0	10,8	5,0	8,5

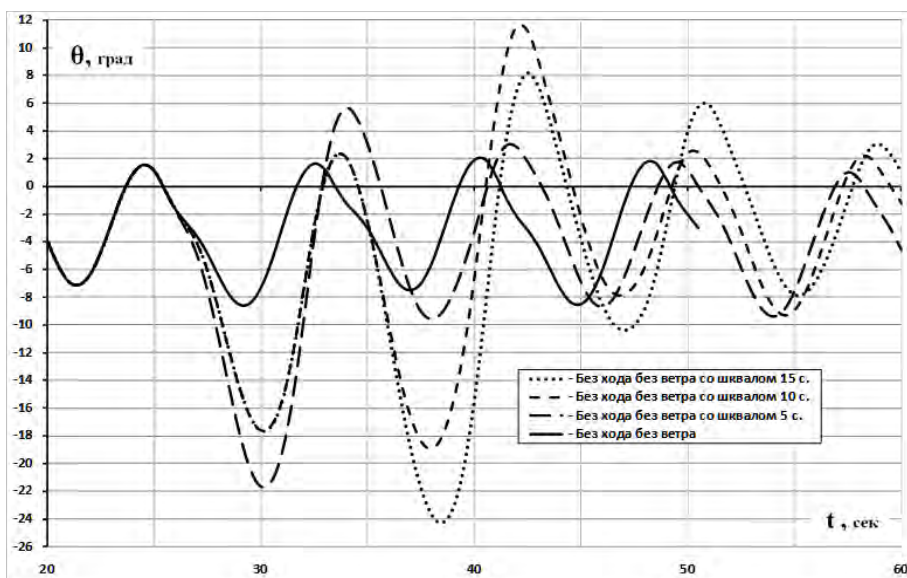


Рис. 2. Динамические наклоны спасательного судна, лежащего в дрейфе, под воздействием шквалов различной длительности при отсутствии постоянного ветра

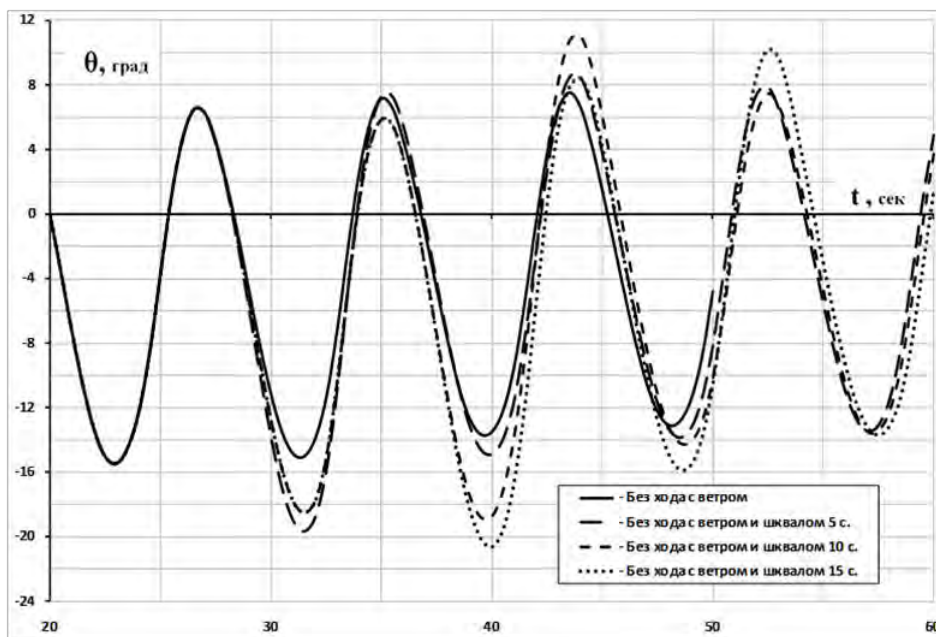


Рис. 3. Динамические наклоны спасательного судна, лежащего в дрейфе, под воздействием шквалов различной длительности при наличии постоянного ветра.

Методологически влияние динамического воздействия ветровой нагрузки следует рассматривать в условиях резонансной бортовой качки. Однако, в соответствии с характеристиками тестовых судов, параметры резонансного волнения отвечают либо не существующим в природе, либо заведомо не опасным, либо однозначно катастрофическим значениям. В этой связи, учитывая предварительный характер исследования, представилось разумным оценить поведение разных судов в условиях «одинаковой погоды» и уже на этапе анализа принимать во внимание их конкретные динамические характеристики. По указанным причинам, для реализации достаточно жестких условий воздействия волнения и ветра, было принято решение рассматривать бортовую качку всех судов на 8-балльном волнении с отношением  $\lambda/h = 20$ , что соответствует длине эквивалентной регулярной волны 104 метра. Скорость постоянно действующего ветра при этом составляет 25 м/с, а скорость шквального ветра принята равной 40 м/с.

Движение всех судов рассматривалось при воздействии кратковременных шквалов длительностью 5, 10 и 15 секунд. Начало действия шквалов привязывалось к моменту максимального наклона судна на наветренный борт и наличию квазиустановившегося режима бортовых колебаний. Время разгона 5-секундного шквала было принято равным 1,5 секунды; время разгона 10-ти и 15-секундного шквалов составляло 3 секунды. Для моделирования качки на ходу были назначены следующие скорости движения судов: контейнеровоз в балласте – 16 узлов; контейнеровоз в полном грузу – 16 узлов; спасательное судно – 17 узлов; накатно-контейнерное судно – 12 узлов; промысловое судно – 15 узлов.

Во всех случаях расчетов движения курс судна вдоль фронта волны поддерживался авторулевым. Следует подчеркнуть, что этот фактор также вносит элемент неопределенности, который проявляется и в реальных условиях. Как настройки авторулевого, так и квалификация вахтенного рулевого-моториста, для одинаковых судов при одной и той же погоде будут порождать разные траектории плавания.

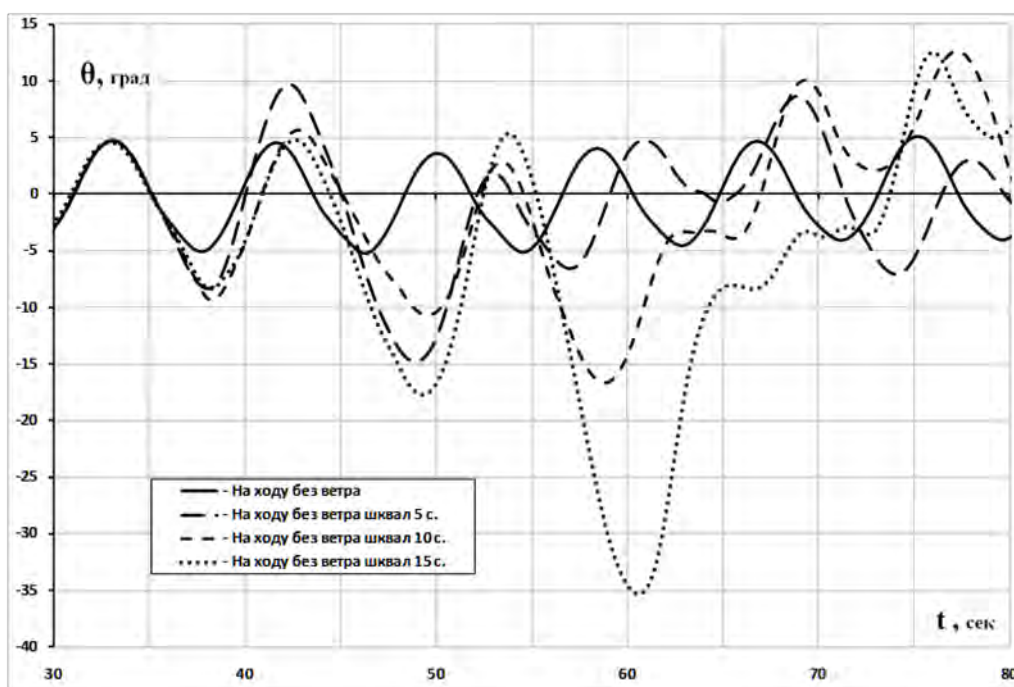


Рис. 4. Динамические наклоны спасательного судна на ходу под воздействием шквалов различной длительности при отсутствии постоянного ветра.



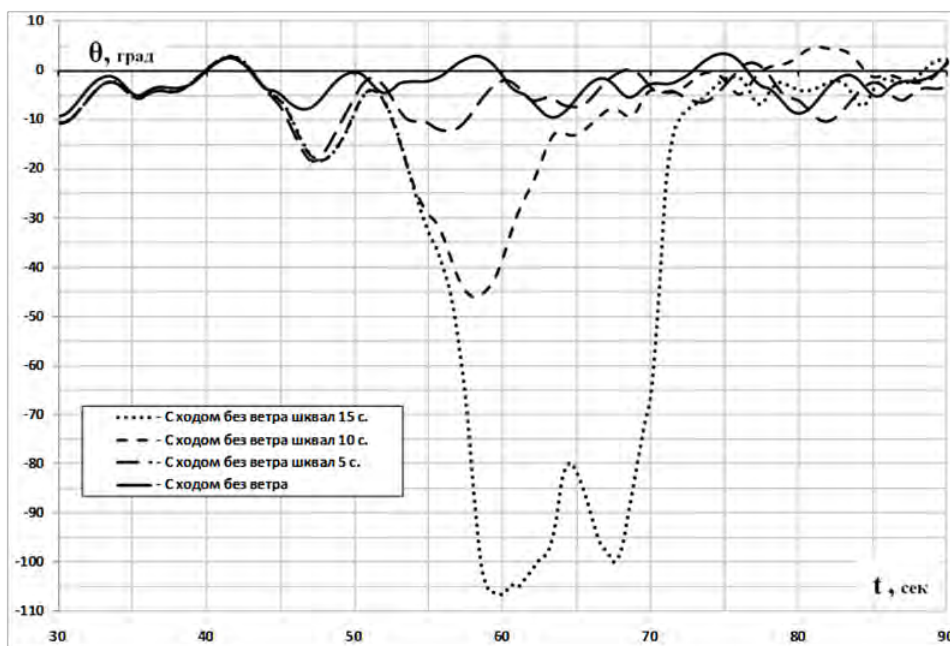


Рис. 5. Динамические наклоны промышленного судна на ходу под воздействием шквалов различной длительности при отсутствии постоянного ветра.

В указанных условиях для тестовых судов было получено около 100 процессов движения. После предварительных расчетов, на основе которых в дальнейшем назначалось время приложения шквального ветра, были выполнены четыре основных серии имитационного моделирования, в которых варьировались наличие или отсутствие хода, наличие или отсутствие постоянного ветра и время действия шквала.

Результаты моделирования бортовой качки судна без хода и постоянно действующего ветра показывают, что первое динамическое наклонение на подветренный борт может быть максимальным, если длительность порыва ветра или шквала

меньше или близка к полупериоду собственных бортовых колебаний. Шквал в 5 секунд практически точно отвечает полупериоду собственных колебаний спасательного судна. Поэтому первое динамическое наклонение на подветренный борт (рис. 2) от этого шквала максимальное (+13,5 градуса). Однако при втором наклонении доминируют уже шквалы в 10 и 15 секунд (+11 и +16,5 градусов соответственно). Переходный процесс воздействия возмущения также затухает за три периода бортовой качки. Характерно, что величина первого наклонения спасателя (22 градуса) в процессе, представленном на рис.2, практически совпадает с расчетом по критерию погоды.

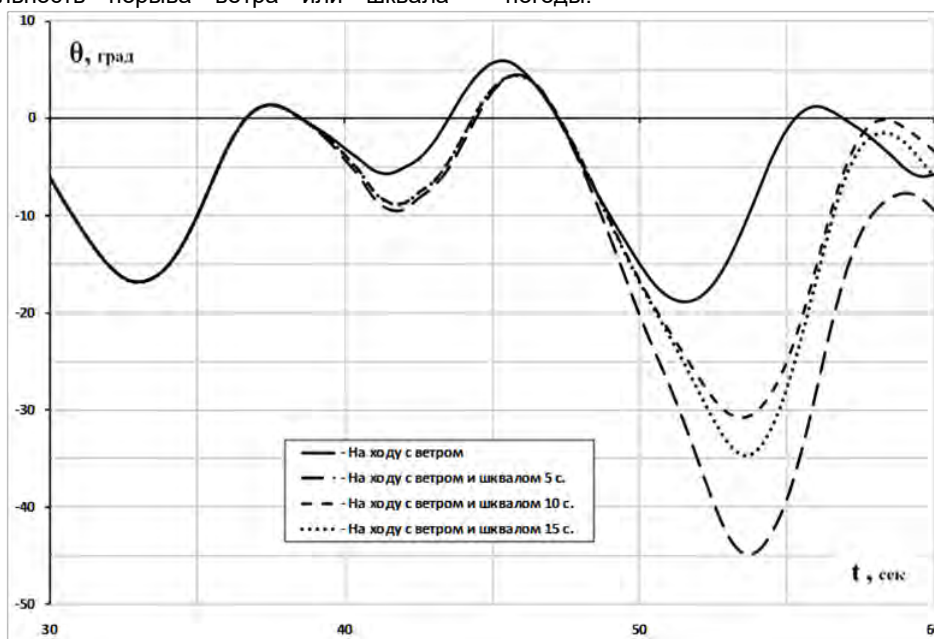


Рис. 6. Динамические наклоны спасательного судна на ходу под воздействием шквалов различной длительности при наличии постоянного ветра.

При качке без хода с постоянным ветром существенным является то, что при возрастании средних амплитуд колебаний присутствие постоянного ветра существенно уменьшает влияния действующих шквалов. Это хорошо видно на примере того же спасательного судна (рис. 3). Этот эффект, в основном, обусловлен характером действия аэродинамического возмущения. Шквальный ветер, как и ранее, имеет скорость 40 м/с, но он не суммируется с постоянно дующим ветром, а замещает его на время своего воздействия. В итоге, скачок скорости воздушного потока составляет только 15 м/с. Таким образом, динамичность приложения шквальной нагрузки существенно снижается. Отсюда вытекает и менее интенсивная реакция судов на импульсное аэродинамическое возмущение. Можно заключить, что наличие постоянно действующего ветра, при среднем возрастании амплитуд колебаний, оказывает стабилизирующее влияние на реакцию судов, обусловленную воздействием порывов ветра и шквалов.

В случае бортовой качки на ходу имеется возможность влиять на траекторию судна посредством руля. За счет иного характера зарыскивания судна имеет место некоторое снижение средних амплитуд колебаний крена. Это имеет место и для спасательного судна (рис. 4). Однако величина второго наклонения (от среднего положения), обязанного действию шквала длительностью 15 секунд, увеличивается (35 градусов вместо 20-ти). Первое динамическое наклонение промыслового судна на ходу несколько меньше, чем без хода (рис. 5). Однако на втором наклонении под действием шквала в 10 секунд крен достигает 45-ти градусов, а под действием шквала в

15 секунд судно опрокидывается на подветренный борт. Причину этого, скорее всего, следует искать в том, что принятая в расчетах длина волны для промыслового судна ближе всего к резонансной (в расчете – 104 м при резонансной 113 м). Кроме того, у этого судна имеет место максимальный (по модулю) коэффициент аэродинамического кренящего момента. Нужно подчеркнуть, как это уже отмечалось, что в отсутствии постоянного фонового ветра воздействие шквала имеет повышенную динамичность, что не может не сказаться на реакции судна. Наконец, под воздействием шквала судно ошутимо зарыскивает под ветер, становясь на попутную волну. Возможно, при этом возникает эффект, схожий с брочингом. Нужно подчеркнуть, что расчет по критерию погоды предсказывает опрокидывание промыслового судна при шквале без хода и постоянного ветра.

Результаты моделирования бортовой качки на ходу в присутствии постоянного ветра, в основном, указывают на увеличение средних амплитуд колебаний при снижении эффекта воздействия шквалов в абсолютных и относительных значениях. Вместе с тем, максимальный угол крена спасательного судна возникает во втором динамическом наклонении под действием шквала в 5 секунд. Крен достигает аварийного значения в 45 градусов (рис. 6). Без ветра максимальный крен (35 градусов) на ходу соответствовал действию шквала в 15 секунд. Динамический крен промыслового судна в присутствии ветра возникает во втором наклонении при шквале в 15 секунд, но не превышает 32,5 градусов (рис. 7). Таким образом, присутствие постоянного ветра на ходу оказывает различное влияние на результат воздействия шквалов.

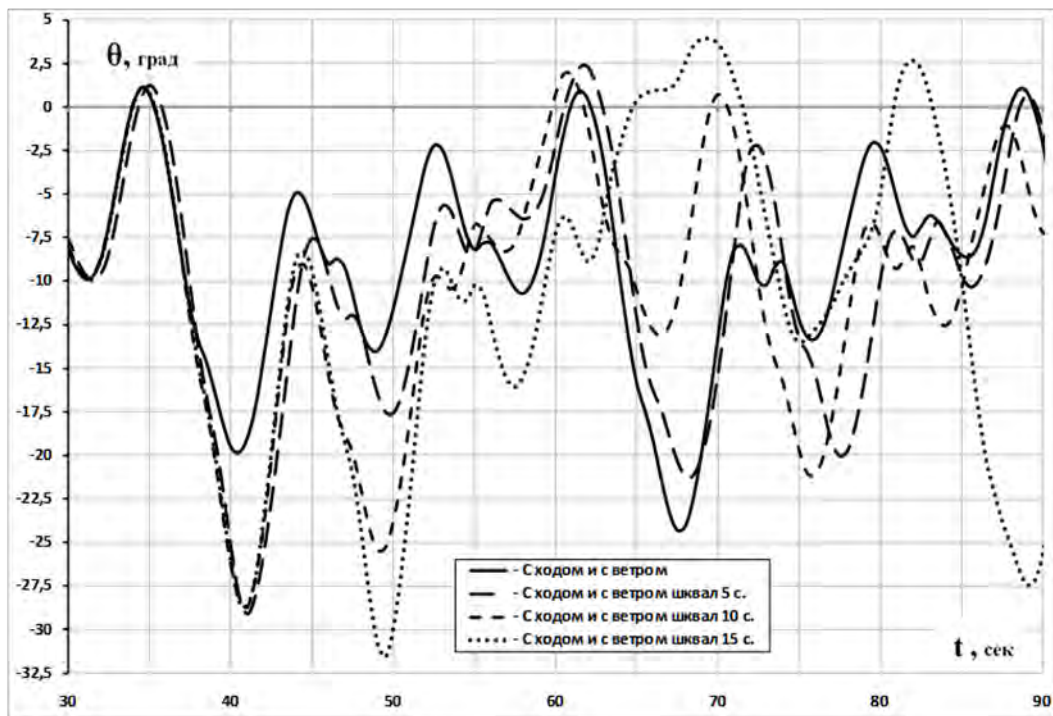


Рис. 7. Динамические наклонения промыслового судна на ходу под воздействием шквалов различной длительности при наличии постоянного ветра.

### Заключение

Выполненное расчетное исследование динамических наклонов судов под действием шквала в рамках условий критерия погоды не может претендовать на исчерпывающий характер. Тем не менее, оно позволяет получить предварительные ответы на вопросы, связанные с неопределенностью оценок безопасности плавания в рамках методологии критерия погоды.

1. В целом, расчетные результаты показывают, что первое динамическое наклонение на подветренный борт может быть максимальным, если длительность порыва ветра или шквала меньше или близка к полупериоду собственных бортовых колебаний. Это зависит также от наличия хода и постоянного ветра. При более длительных шквалах максимальным будет, скорее всего, второе или, в отдельных случаях, третье наклонение.
2. Нельзя однозначно утверждать, что наличие хода усиливает динамическое воздействие шквала. Однако возникающие на ходу эффекты интенсивного зарыскивания и сопутствующие им углы дрейфа влияют на амплитуды динамических наклонов, как в течение, так и после воздействия шквалов. Эти эффекты сильнее всего проявляются для бортовой качки судов в околорезонансной области.
3. Сопоставление результатов моделирования для различных условий плавания указывает на близость качественной картины воздействия шквалов во всех рассмотренных ситуациях. Однако в количественном отношении для разных судов могут иметь место существенные отличия.
4. Расчеты показали, что наличие постоянно действующего ветра оказывает микширующее влияние на действие шквала, снижая

динамичность его приложения и общую интенсивность процессов наклонов судов. При этом средние амплитуды качки судна при наличии ветра возрастают.

5. Имитационное моделирование показало, что для малых судов, имеющих периоды собственных бортовых колебаний в пределах 7 – 9 секунд, для которых волнение высокой балльности приближается к резонансному, требуется детальное изучение поведения в условиях воздействия шквального ветра.
6. Исследование показывает, что переходные процессы возмущенного движения судов после воздействия одиночного шквала имеют длительность от трех периодов бортовой качки и более. При этом возбуждаемое шквалом зарыскивание и дрейф вызывают значительные, превышающие средние значения, бортовые колебания. В этих условиях воздействие повторного порыва ветра или шквала может иметь катастрофические последствия. Думается, что этот вопрос требует специального исследования.
7. Сравнение результатов моделирования с оценками воздействия шквалов посредством критерия погоды позволяют утверждать, что, несмотря на существенную упрощающую схематизацию процесса бортовой качки при воздействии порывов ветра и шквалов, критерий погоды представляется вполне эффективным средством прогнозирования безопасности штормового плавания судов.

В целом можно констатировать, что бортовая качка судов при воздействии порывов ветра и шквалов требует тщательных исследований, направленных на уточнение влияния характеристик судов и параметров действующих возмущений на условия безопасности плавания и судовождения.

### Литература

1. Бородай И.К., Рахманин Н.Н. Возможные критерии безопасности судна на волнении. Тезисы докл. на XL Крыловских чтениях, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, 2001, с. 3 – 4.
2. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 2. Статика судов. Качка судов/ Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985 – 440 с.
3. Гордиенко А.И., Захарьян Р.Г. Плавание судов в особо тяжелых погодных условиях: Учеб. пособие. – СПб: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2004. - 98 с.
4. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с. ISBN.
5. Потехин Ю.П. Концепция и реализация «распределенной» динамической модели корабля. Тезисы докл. на XLII Крыловских чтениях, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, 2006.
6. Липис В.Б., Ремез Ю.В. Безопасные режимы штормового плавания судов. Справочно-практическое пособие. – М.: Транспорт, 1982. 117 с.
7. Прикладные задачи динамики судов на волнении/ И.К. Бородай, В.А. Мореншильдт, Г.В. Виленский и др. – Л.: Судостроение, 1989. – 264 с.

### References

1. Borodaj I.K., Rahmanin N.N. Vozmozhnye kriterii bezopasnosti sudna na volnenii [Possible criteria for the safety of a vessel in waves]. Tezisy dokl. na XL Krylovskih chtenijah, CNII im. akad. A.N. Krylova, SPb, 2001, s. 3 – 4.
2. Spravochnik po teorii korablja: V treh tomah. Tom 2. Statika sudov. Kachka sudov [ Statics of ships. Rolling of ships ] / Pod red. Ja.I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985 – 440 s.
3. Gordienko A.I., Zahar'jan R.G. Plavanie sudov v osobo tjazhelyh pogodnyh uslovijah [Sailing of ships in especially difficult weather conditions]: Ucheb. posobie. – SPb: GMA im. adm. SO. Makarova, 2004. - 98 s.
4. Borodaj I.K., Necvetaev Ju.A. Morehodnost' sudov [Seaworthiness of ships] – L.: Sudostroenie, 1982. – 288 s. ISBN.
5. Potehin Ju.P. Konceptcija i realizacija «raspredelennoj» dinamicheskoj modeli korablja [Concept and implementation of a "distributed" dynamic ship model]. Tezisy dokl. na XLII Krylovskih chtenijah, CNII im. akad. A.N. Krylova, SPb, 2006.

6. Lipis V.B., Remez Ju.V. Bezopasnye rezhimy shtormovogo plavanija sudov [Safe modes of stormy navigation of ships]. Spravochno-prakticheskoe posobie. – M.: Transport, 1982. 117 s.
7. Prikladnye zadachi dinamiki sudov na volnenii [Applied problems of ship dynamics on waves]/ I.K. Borodaj, V.A. Morenshil'dt, G.V. Vilenskij i dr. – L.: Sudostroenie, 1989. – 264 s.

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

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

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

**Мьо Тху Киав** магистр техники и технологии, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: motuk.tec13@mail.ru

**Myo Thu Kiav** master of Engineering and Technology, Saint Petersburg State Marine Technical University, 190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya Street, 10, e-mail: motuk.tec13@mail.ru

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

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

Поступила в редакцию: 15.11.2020

Принята к публикации: 15.02.2021



УДК 533.6.04

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.024

## Численное моделирование движения профиля над экраном и определение его аэродинамических характеристик

М.А. Ливеринова<sup>1</sup> e-mail: mary.liverinova@mail.ru, Н.В. Тряскин<sup>1</sup> e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

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

**Аннотация** В работе изучается движение профиля над экраном на различных относительных высотах. Рассмотрены следующие методы его моделирования: условие неподвижного экрана и метод зеркального отображения для моделирования обращённого движения и условие экрана, движущегося со скоростью профиля, что моделирует прямое движение. Целью работы является выбор метода моделирования экрана, при котором обтекание профиля соответствует действительности и оценка разницы между рассмотренными методами. Задача решена в открытом пакете OpenFOAM методом контрольного объёма, где совместно решены уравнения Навье-Стокса и неразрывности, осреднённые по Рейнольдсу. Произведена верификация и валидация математической модели и найдено сеточно-независимое решение. Выбраны два профиля в плане: сегментный и симметричный. Рассмотрены несколько относительных высот. В работе построены эпюры скоростей под профилем, представлены картины обтекания профилей, исследованы их основные эксплуатационные характеристики: коэффициент подъёмной силы и коэффициент сопротивления в зависимости от относительной высоты. Построено распределение коэффициента давления по поверхности рассматриваемых профилей в зависимости от граничных условий и относительных высот. В результате анализа показано различие происходящих физических процессов при обтекании профилей в прямом и обращённом движении. Данная работа позволяет сделать вывод о том, каким образом проводить физический эксперимент для различных профилей, показывает преимущество использования метода зеркальных отображений или подвижного экрана при проведении эксперимента.

**Ключевые слова:** CFD, численное моделирование, уравнения Рейнольдса, гидродинамические характеристики крыла, экранный эффект, численный расчёт профиля, метод зеркальных отображений, метод подвижного экрана.

## Numerical determination of aerodynamic characteristics of an airfoil in a ground effect

Mariya A. Liverinova<sup>1</sup> e-mail: mary.liverinova@mail.ru, Nikita V. Tryaskin<sup>1</sup> e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

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

**Abstract** In this article the movement of the profile above the screen at different relative heights is reviewed. The following methods of its modeling are considered: the condition of a stationary screen and the method of images for simulating reverse motion and the condition of a screen moving with the profile speed that simulate forward motion are considered. The aim of the work is to select a screen simulation method for a physical experiment. An open-source packet OpenFOAM based on finite-volume method is used to solve the Navier-Stokes and continuity equations averaged by Reynolds method. The mathematical model is verified and validated, and a grid-independent solution is found. Two profiles are selected: segmental and symmetrical. Several relative heights are considered. The velocity profiles under the airfoil are constructed, the patterns of the flow around the airfoils are presented. The dependences of coefficients on the studied parameters and the distribution of the pressure coefficient over the profile are studied and analyzed. As a result of the analysis, the difference between the physical processes when flowing around the airfoils is in forward and reverse motion is shown. This work allows us to make a conclusion about how to conduct a model experiment for various profiles, shows the advantage of using the method of images or a movable screen in the experiment.

**Key words:** CFD, numerical simulation, Reynolds equations, airfoil, hydrodynamic characteristics, ground effect, method of images, method of a moving screen.

### Введение

Активное исследование крыльевых систем, движущихся над свободной поверхностью связано с со значительным увеличением подъёмной силы при приближении к экрану и ростом аэродинамического качества. Повышение несущих свойств крыла связано с увеличением давления на нагнетающей стороне, в результате чего между крылом и опорной поверхностью возникает динамическая воздушная подушка. Экспериментально полученные данные показывают, что в большом диапазоне относительных скоростей движения свободная поверхность воды ведёт себя по отношению к надводному крылу как твёрдая стенка, что связано со значительной разницей плотностей рассматриваемых сред (вода – воздух). В связи с

этим фактом, при численном и физическом эксперименте свободная поверхность моделируется твёрдой стенкой.

Raymond [1] провёл экспериментальное исследование аэродинамических характеристик крыльев, движущихся вблизи экрана. Автор рассмотрел движение трёх моделей крыльев прямоугольной формы в безграничной жидкости, над неподвижным экраном и с использованием метода зеркального отображения. Raymond в 1921 г. предположил, что экранный эффект может обеспечить экономичный полёт транспортного средства над поверхностью воды с большой скоростью.

Zerihan J. и Zhan X. [2], [3] провели модельные испытания одноэлементного крыла на малых скоростях. Экран моделировался подвижной

стенкой. Авторы исследовали силы, возникающие на профиле, также Zerihan J. и Zhan X. отмечают эффект присасывания при отстоянии задней кромки менее чем на 20% относительно хорды от экрана, при отстоянии менее 10% сила присасывания уменьшается, что авторы объясняют отрывом пограничного слоя от задней кромки.

Различные граничные условия, включая условие неподвижной стенки, симметрии (метод зеркального отображения) и движущегося относительно крыла экрана исследовали и другие. Например, Diuzer (1985), Fago (1991), Barber (1999). В перечисленных работах авторы отмечают, что в результате моделирования экрана различными способами возникают различия между полученными результатами, и то, что наиболее корректным способом моделирования экранного эффекта является движущаяся стенка.

Рождественский К.В. в своих работах [4], [14] говорит о современном состоянии и перспективах применения экранного эффекта. Дан ряд оценок аэродинамических характеристик и экономической эффективности экранопланов. Рассмотрено влияние волн, исследованы эффективность взлёта, аэродинамическое качество, расход топлива и т.д.

Ahmed M.R. и Sharma S.D. [5] провели экспериментальное исследование движения симметричного профиля с низкими скоростями над экраном. Углы атаки изменялись в диапазоне от 0° до 10°, а отстояние от экрана рассмотрено от практически минимально возможного до расстояния в одну хорду. Определены зависимости подъёмной силы и силы сопротивления от изменяемых параметров. Построены коэффициенты давления. Определено, что наибольшая подъёмная сила достигается при наименьшем отстоянии от экрана.

Численное моделирование в своих работах рассмотрели Young [6] и Xing [7], [8]. В исследованиях решается осреднённое по Рейнольдсу уравнение Навье-Стокса. Результаты хорошо согласуются с экспериментом.

Yang W. и Yang Z. [9] в своей работе рассмотрели влияние различных граничных условий на результаты численного моделирования, исследовано движение симметричного профиля с углами атаки в диапазоне от 0° до 14° на различных относительных высотах, а также рассмотрено влияние сжимаемости среды на гидродинамические характеристики.

В статье Бесядовского А.Р. [10] рассмотрена крыльевая компоновка с углублением в вопрос устойчивости крыла, предложены комбинации углов атаки, обеспечивающих хорошие несущие способности компоновки.

Влияние параметров турбулентности на характеристики переходного режима течения при обтекании профиля рассмотрены в [11] с применением численных методов в пакете OpenFOAM.

На сегодняшний день существует несколько способов экспериментального исследования движения профиля над экраном в аэродинамических трубах: моделирование экрана неподвижной стенкой, использование метода зеркального отображения, метода подвижной стенки. Также возможен отсос образующегося пограничного слоя с переменным или постоянным расходом по экрану.

Целью данной работы является выбор метода моделирования экрана, оценка разности между прямым и обращённым движением по аэродинамическим характеристикам. Рассмотрены различные относительные высоты для движения двух профилей: симметричного и сегментного.

### 1. Математическая постановка задачи

В задаче о численном моделировании движения крыла над твёрдой стенкой решаются уравнения Навье-Стокса и неразрывности, осреднённые по Рейнольдсу, численная реализация задачи осуществляется методом контрольного объёма. Рассматривается плоская задача, прямое и обращённое движение.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \langle u_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Для замыкания уравнений (1)-(2) используется градиентно-диффузионная гипотеза и уравнениями переноса для модели турбулентности  $k - \omega SST$ , которая была использована в работе [12]:

Для решения системы дифференциальных уравнений приняты следующие граничные условия:

– на входной границе расчётной области (рисунок 1) задаются следующие условия:  $\vec{u} = \vec{u}_0$ ,  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ , где  $\vec{u}_0$  – скорость потока,  $p$  – абсолютное давление;

– на выходной границе расчётной области задаются следующие условия:  $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$ ,  $p = p_0$ , где  $p_0$  – относительное давление;

– на верхней границе расчётной области задаются следующие условия:  $\vec{u} = \vec{u}_0$ ,  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$ ;

– на нижней границе расчётной области задаются следующие условия:  $\vec{u} = \vec{u}_0$  для прямой задачи,  $\vec{u} = 0$  для обратной задачи,  $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial \alpha}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ , для метода зеркальных отображений – условие симметрии для всех переменных;

– на профиле крыла задаются следующие условия:  $\vec{u} = 0$ ,  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial \alpha}{\partial n} = 0$ ,  $k$  и  $\omega$  определяются с помощью пристеночных функций [13].

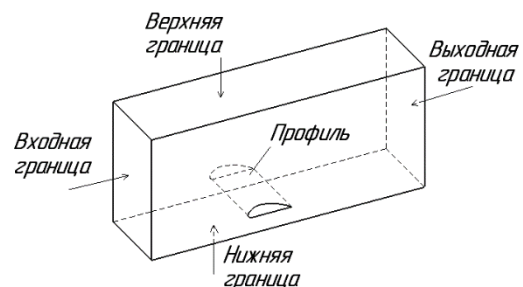


Рис. 1 – Обозначение границ расчётной области

**2. Верификация и валидация математической модели**

Для определения сеточной сходимости решения по коэффициенту подъемной силы и силы сопротивления использован безразмерный параметр, аналогичный числу Рейнольдса, выраженному через отстояние данной точки потока от стенки:

$$y^+ = \frac{yU^*}{\nu} \quad (5)$$

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 для симметричного профиля, движущегося под углом атаки  $\alpha = 4^\circ$  со скоростью  $Re = 6 \cdot 10^6$  на относительном расстоянии  $\frac{h}{b} = 0.1$ . Сходимость достигнута при  $y^+ = 0.8$ .

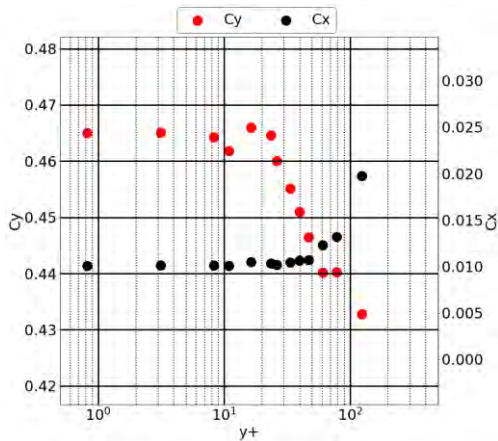


Рис. 2 – Сеточная сходимость

Валидация математической модели основана на эксперименте [5], в котором рассмотрен профиль, движущийся в безграничной среде со скоростью  $Re = 3.6 \cdot 10^5$  с углами атаки:  $\alpha = 0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, 7.5^\circ, 10^\circ$ . Результаты сравнения, представленные на рисунке 3, хорошо согласуются с экспериментальными данными по коэффициенту подъемной силы и сопротивления.

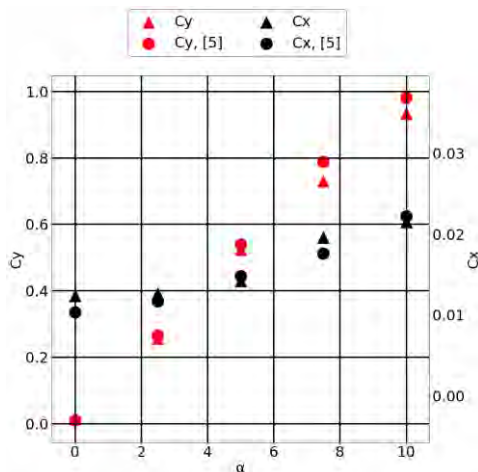


Рис. 3 – Валидация математической модели

**3. Результаты численного моделирования**

*Исходные данные*

Для численного моделирования поставленной задачи выбраны два профиля в плане с толщиной 5%, показанные на рисунке 4: симметричный (а), сегментный (б). Обтекание профилей рассмотрено при различных относительных высотах  $h/b$ , где  $h$  – расстояние от хвостика профиля до экрана,  $b$  – хорда.

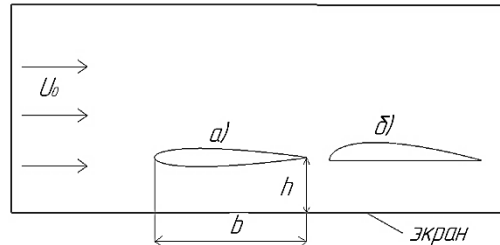


Рис. 4 – Профили в плане: а) симметричный, б) сегментный

Движение профилей рассмотрено при скорости  $Re = 6 \cdot 10^6$  на следующих относительных высотах:  $\frac{h}{b} = 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$ .

*Зависимость коэффициентов сил от относительной высоты и метода моделирования экрана*

На рисунке 5 представлен график зависимости коэффициента подъемной силы от относительной высоты для трёх граничных условий на нижней границе при движении симметричного профиля с углом атаки  $\alpha = 4^\circ$ . Также на графике приведены результаты, полученные в [9]. Для условия симметрии и подвижной стенки, полученные значения совпадают. При условии неподвижной стенки экранного эффекта не наблюдается до высоты  $\frac{h}{b} = 0.05$ . Для подвижного экрана и задачи с условием симметрии экранного эффекта не наблюдается до относительной высоты  $\frac{h}{b} = 0.1$ .

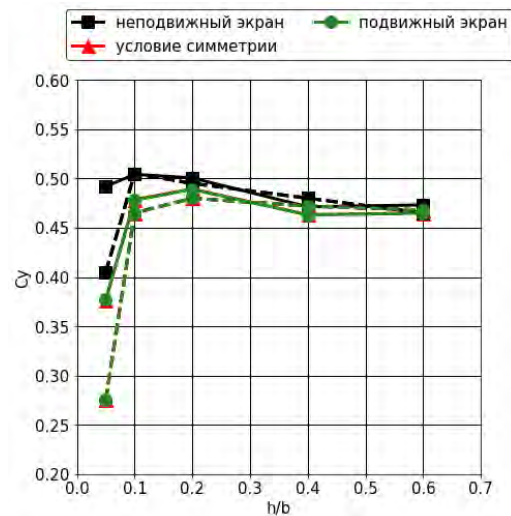


Рис. 5 – Зависимость коэффициента подъемной силы от относительной высоты, симметричный профиль,  $\alpha = 4^\circ$ . Пунктирная линия – [9], сплошная линия – расчёт



На рисунке 6 приведена зависимость коэффициента сопротивления от относительной высоты, также представлены результаты, полученные в [9]. Можно отметить, что значения  $C_x$  для неподвижного экрана меньше, для двух других условий на границе.

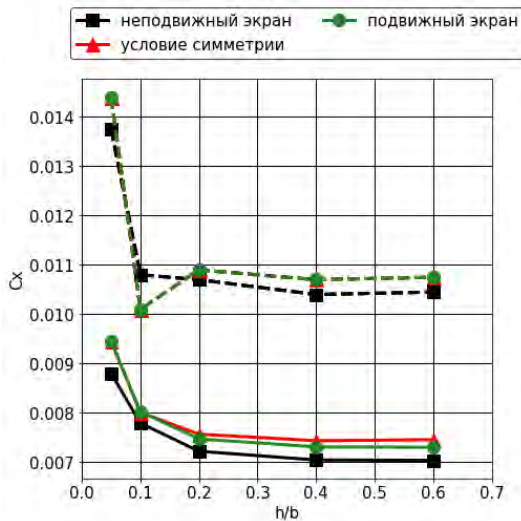


Рис. 6 – Зависимость коэффициента сопротивления от относительной высоты, симметричный профиль,  $\alpha = 4^\circ$ . Пунктирная линия – [9], сплошная линия – расчёт

На рисунке 7 приведён коэффициент подъёмной силы для сегментного и симметричного профилей. Из графика видно, что подъёмная сила, возникающая на сегментном профиле, значительно больше, чем на симметричном. Для сегментного профиля экранного эффекта не наблюдается до относительной высоты  $\frac{h}{b} = 0.1$  для неподвижного экрана. Для подвижного экрана и симметричного граничного условия экранный эффект существует на всем диапазоне рассмотренных относительных высот. В отличие от симметричного профиля, у сегментного не наблюдается эффекта присасывания при условии подвижного экрана.

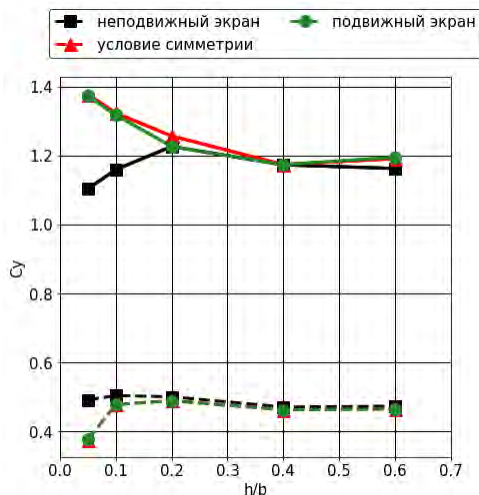


Рис. 7 – Коэффициент подъемной силы для сегментного и симметричного профилей,  $\alpha = 4^\circ$ . Пунктирная линия – симметричный профиль, сплошная линия – сегментный профиль

На рисунке 8 приведена зависимость коэффициента сопротивления от относительной высоты. Сопротивление на участке до  $\frac{h}{b} = 0.1$  для задачи с неподвижным экраном значительно выше, чем при двух других условиях. Для условия симметрии и подвижного экрана кривые схожи на всех рассмотренных относительных высотах.

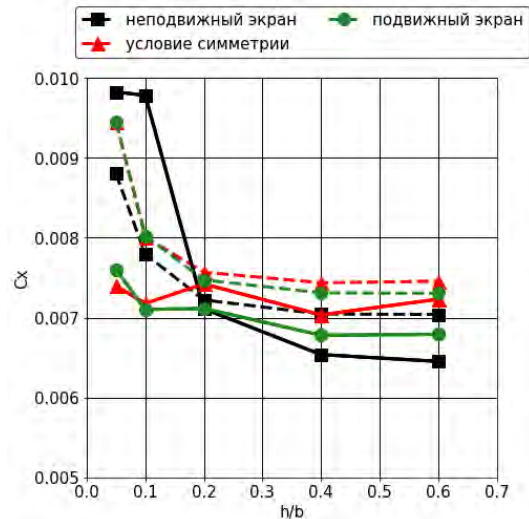


Рис. 8 – Коэффициент сопротивления для сегментного и симметричного профилей,  $\alpha = 4^\circ$ . Пунктирная линия – симметричный профиль, сплошная линия – сегментный профиль

Профиль скорости под сегментным и симметричным профилями в зависимости от метода моделирования экрана

На рисунках 9–10 представлен безразмерный профиль скорости между симметричным/сегментным профилями и экраном для задачи с граничным условием неподвижного и подвижного экрана на нижней границе в сечениях  $x = 0.05 \cdot b$  и  $x = 0.5 \cdot b$  соответственно. Из рисунка 9 видно, что вектор скорости меняет направление (знак).

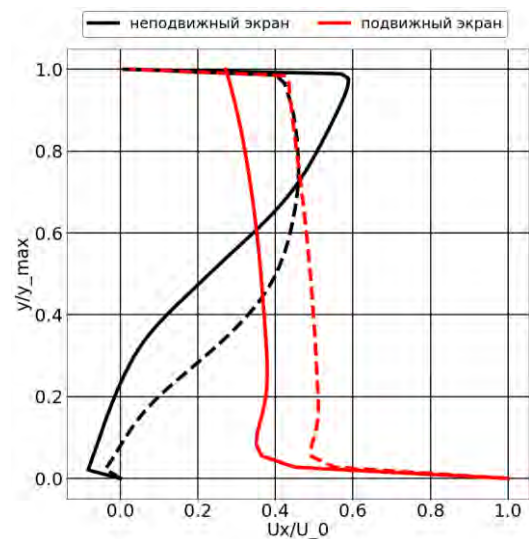


Рис. 9 – Профиль скорости при  $x = 0.05 \cdot b$ ,  $\frac{h}{b} = 0.05$ . Пунктирная линия – симметричный профиль, сплошная линия – сегментный профиль



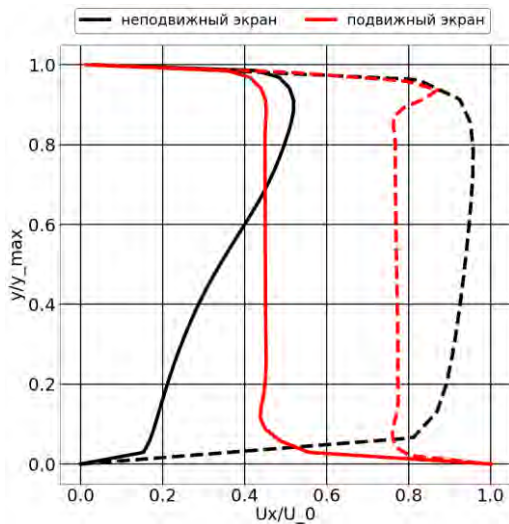


Рис. 10 – Профиль скорости при  $x = 0.5 \cdot b, \frac{h}{b} = 0.05$ .  
Пунктирная линия – симметричный профиль,  
сплошная линия – сегментный профиль

На рисунке 11 приведены линии тока при обтекании симметричного профиля с условием подвижного экрана (а) и неподвижного экрана (б). Для неподвижного экрана заметно изменение обтекания под носиком. Поле турбулентной кинетической энергии под носиком представлено на рисунке 12.

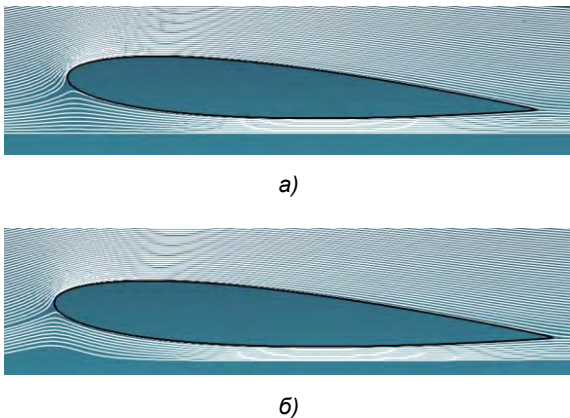


Рис. 11 – Линии тока при обтекании симметричного профиля под углом атаки  $\alpha = 4^\circ, \frac{h}{b} = 0.05$ : а) условие подвижного экрана, б) неподвижный экран

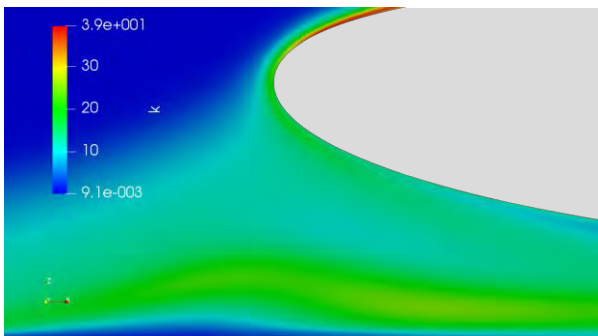


Рис. 12 – Поле турбулентной кинетической энергии, симметричный профиль,  $\frac{h}{b} = 0.05$

На рисунке 13 приведены линии тока при обтекании сегментного профиля с условием подвижного экрана (а) и неподвижного экрана (б). Для неподвижного экрана также заметно изменение обтекания под носиком, которое значительно больше, чем у симметричного. Поле турбулентной кинетической энергии под носиком представлено на рисунке 14. Таким образом, при моделировании экранного движения неподвижным экраном происходит вихреобразование, которое может быть объяснено большим градиентом давления и отрывом пограничного слоя.

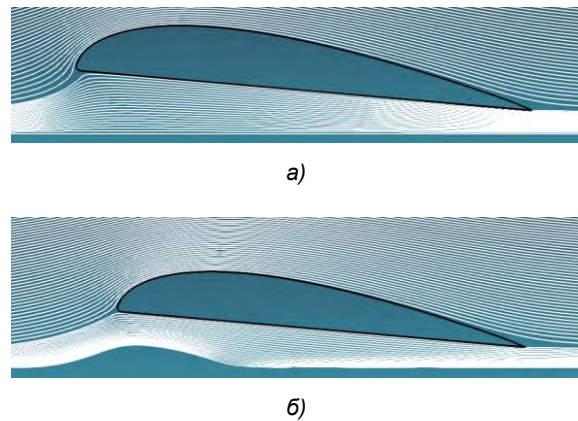


Рис. 13 – Линии тока при обтекании сегментного профиля под углом атаки  $\alpha = 4^\circ, \frac{h}{b} = 0.05$ : а) условие подвижного экрана, б) неподвижный экран

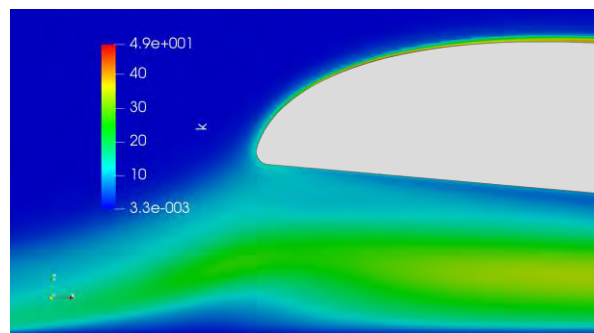


Рис. 14 – Поле турбулентной кинетической энергии, сегментный профиль,  $\frac{h}{b} = 0.05$

Зависимость коэффициента давления от метода моделирования экрана

На рисунках 15–16 приведено распределение коэффициента давления по симметричному и сегментному профилям. Из графиков видно, что давление на засасывающей поверхности профиля практически не изменяется в зависимости от относительной высоты и граничных условий. На нагнетающей стороне симметричного профиля граничное условие оказывает слияние до  $\frac{h}{b} = 0.05$ , для сегментного профиля – до  $\frac{h}{b} = 0.1$ . При условии подвижного крана у симметричного профиля наблюдается падение давления, физически это объяснимо эффектом присасывания профиля к экрану. Для сегментного профиля такого эффекта не наблюдается.

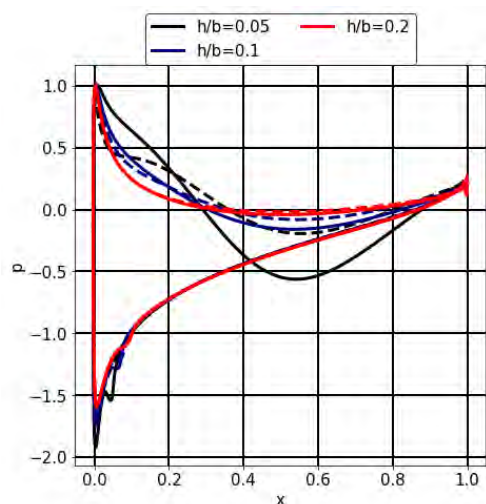


Рис. 15 – Распределение коэффициента давления по поверхности симметричного профиля. Пунктирная линия – неподвижный экран, сплошная линия – подвижный экран

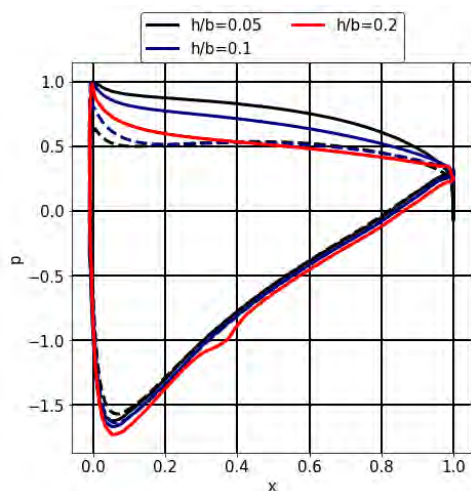


Рис. 16 – Распределение коэффициента давления по поверхности сегментного профиля. Пунктирная линия – неподвижный экран, сплошная линия – подвижный экран

### Заключение

Анализ влияния граничных условий на экране показал, что моделирование экрана неподвижной стенкой приводит к изменению обтекания профиля, появлению вихреобразования, связанное с отрывом пограничного слоя из-за большого градиента давления. Использование условия симметрии и условия подвижного экрана дают близкие результаты. Для симметричного профиля изменения в картине обтекания наблюдается до относительной высоты  $\frac{h}{b} = 0.05$ , для сегментного – до  $\frac{h}{b} = 0.1$ . Можно сделать вывод о влиянии кривизны средней линии профиля на диапазон расстояний, когда наблюдается отрыв пограничного слоя в носовой части профиля.

Таким образом, при проведении физического эксперимента для поставленной задачи необходимо использовать либо метод зеркальных отображений, либо метод подвижного экрана для получения действительной картины.

### Благодарности

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

### Литература

1. Raymond Arthur E. Ground influence on airfoils. Naca Technical Note 67, 1921.
2. Zerihan J., Zhang X. Aerodynamics of a single element wing in ground effect. Journal of Aircraft, 37 (6), с. 1058-1064, 2000.
3. Zhang X., Zerihan J. Turbulent wake behind a single element wing in ground effect. Proceedings of the 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Portugal, 2002.
4. Rozhdestvensky Kirill V. Wing-in-ground effect vehicles. Progress in Aerospace Science, 2006, 42, с. 211 – 283.
5. Ahmed MR., Sharma S D. An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29, с. 633 - 647.
6. Young J Moon. Aerodynamic investigation of three-dimensional wings in ground effect for aero-levitation electric vehicle. Aerospace Science and Technology, 2005, 9, с. 485 - 494.
7. Xing Fu, Wu Baoshan. Investigation on numerical prediction of WIGs aerodynamics. Journal of Ship Mechanics, 2004, 6(8), с. 19 – 30.
8. Wu Baoshan, Xing Fu. Investigation of hydrodynamic characteristics of submarine moving close to the sea bottom with CFD methods. Journal of Ship Mechanics, 2005, 3(9), с. 19 – 28.

9. Yang W., Yang Z. Aerodynamic investigation of a 2D wing and flows in ground effect. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(2), с. 231 – 240.
10. Бесядовский А.Р., Латушко А.И. Сравнение различных компоновок экранопланов. Морские интеллектуальные технологии, 2012, №1 (15), с. 45-47.
11. Али Р., Тряскин Н.В. Влияние параметров турбулентности на характеристики переходного режима течения при обтекании профиля NACA0012. Морские интеллектуальные технологии, 2019, № 3-2 (45), с. 39-44.
12. Ливеринова М.А., Тряскин Н.В. Численное моделирование гидродинамических характеристик крыла, движущегося под свободной поверхностью. Морские интеллектуальные технологии, 2020, № 4-3 (50), с. 32-38.
13. ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November 2013.
14. Rozhdestvensky Kirill V. Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect, 2000, Springer, Heidelberg-London-New York-Paris-Tokyo, 350 pages.

#### References

1. Raymond Arthur E. Ground influence on airfoils. Naca Technical Note 67, 1921.
2. Zerihan J., Zhang X. Aerodynamics of a single element wing in ground effect. Journal of Aircraft, 37 (6), 1058-1064, 2000.
3. Zhang X., Zerihan J. Turbulent wake behind a single element wing in ground effect. Proceedings of the 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Portugal, 2002.
4. Rozhdestvensky Kirill V. Wing-in-ground effect vehicles. Progress in Aerospace Science, 2006, 42: 211 – 283.
5. Ahmed MR., Sharma S D. An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29: 633 - 647.
6. Young J Moon. Aerodynamic investigation of three-dimensional wings in ground effect for aero-levitation electric vehicle. Aerospace Science and Technology, 2005, 9: 485 - 494.
7. Xing Fu, Wu Baoshan. Investigation on numerical prediction of WIGs aerodynamics. Journal of Ship Mechanics, 2004, 6(8): 19 – 30.
8. Wu Baoshan, Xing Fu. Investigation of hydrodynamic characteristics of submarine moving close to the sea bottom with CFD methods. Journal of Ship Mechanics, 2005, 3(9): 19 – 28.
9. Yang W., Yang Z. Aerodynamic investigation of a 2D wing and flows in ground effect. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(2): 231 – 240.
10. Besyadovskiy A.R., Latushko A.I. Sravnenie razlichnykh komponovok ekranovlanov [Comparison of different layouts of ekranoplanes]. Morskie intellektualnye tekhnologii, 2012, №1 (15), s. 45-47.
11. Ali R., Tryaskin N.V. Vliyaniye parametrov turbulentsnosti na kharakteristiki perekhodnogo rezhima techeniya pri obtakanii profilya NACA0012 [Effects of turbulence variables on transition flow characteristics over naca 0012 airfoil at moderate reynold number]. Morskie intellektualnye tekhnologii, 2019, №3-2 (45), s. 39-44.
12. Pavlovskij V.A., Nikushhenko D.V. Vychislitel'naja gidrodinamika. Teoreticheskie osnovy: Uchebnoye posobie [Computational Fluid Dynamics. Theoretical Foundations: Study Guide]. – SPb.: Izdatel'stvo Lan, 2018.
13. ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November 2013.
14. Rozhdestvensky Kirill V. Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect, 2000, Springer, Heidelberg-London-New York-Paris-Tokyo, 350 pages.

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

**Мария Алексеевна Ливеринова**, магистр, 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**, master, 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

Поступила в редакцию: 14.10.2020

Принята к публикации: 10.01.2021

УДК 629.12: 539.433

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.025

## Расчет параметров вынужденных установившихся колебаний трубопровода

А.Л. Мелконян<sup>1</sup> e-mail: mel1950@mail.ru, Д.А. Николаев<sup>1</sup> e-mail: D.Nikolaevl@d-nik.de,  
М.В. Чуклин<sup>1</sup> e-mail: chuklin@mail.ru

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

**Аннотация.** Для расчета параметров вибрации трубопроводов (амплитуды смещений, внутренних усилий и опорных реакций) разработаны модель, алгоритм и программа. Модель – квазиодномерная конечноэлементная система. Алгоритм расчета построен на базе метода парциальных откликов в его дискретном варианте. Выведены формулы для парциальных откликов и парциальных параметров, необходимые при реализации предложенного алгоритма. Влияние протекающей жидкости учтено приложением дополнительной инерционной нагрузки, которая, в свою очередь, учитывается коррекцией и модификацией инерционно-жесткостных характеристик модели трубопровода.

В качестве примера рассмотрена задача о вибрации прямого трубопровода постоянного поперечного сечения, опирающегося на две опоры. Выполнено исследование влияния составляющих инерционной нагрузки на параметры вибрации, значения собственных частот и величину критической скорости жидкости. Оценена сходимость процесса в случае необходимости применения метода последовательных приближений.

**Ключевые слова:** установившиеся колебания, квазиодномерная модель, коррекция и модификация, инерционно-жесткостные характеристики, парциальные отклики, последовательные приближения.

## Calculation of parameters of forced steady - state fluctuations of the pipeline

Armen L. Melkonian<sup>1</sup> e-mail: mel1950@mail.ru, Dmitry A. Nikolaev<sup>1</sup> e-mail: D.Nikolaevl@d-nik.de,  
Mikael V. Chuklin<sup>1</sup> e-mail: chuklin@mail.ru

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Marine Technical University

**Abstract.** To analyze vibration parameters of the pipeline (displacement amplitudes, internal forces, and support reactions) the model, algorithm, and program were created. The model is a quasi-one-dimensional (quasi-1D) finite element system. The calculation algorithm is based on the discrete version of the partial responses method. Formulas for partial responses and partial parameters necessary for the implementation of the proposed algorithm were derived. The influence of the flowing liquid is compensated by applying an additional inertial load, which, in turn, is taken into account by correcting and modifying the inertia-stiffness characteristics of the pipeline model.

The problem of the vibration of a straight pipeline of a constant cross-section with two points of support is given as an example. The influence of inertial load components on vibration parameters, own frequency values, and the critical velocity of the liquid were studied. The convergence of the process in case of using method of successive approximations was estimated.

**Keywords:** steady-state oscillations, quasi-one-dimensional model, correction and modification, inertial-stiffness characteristics, partial responses, successive approximations.

При проектировании и разработке различных инженерных конструкций (приборов, аппаратов, установок и т.д.) их составной частью являются трубопроводы, предназначенные для транспортировки газообразных и жидких веществ. Воздействие движущегося потока может способствовать возникновению колебаний трубопровода, которые в свою очередь, приводят к нарушению условий эксплуатации конструкции, снижению её надёжности, прочностных характеристик, а также последующему разрушению элементов и сооружения в целом. Важно вспомнить здесь и о вредном физиологическом влиянии вибрации. Систематические, даже умеренные и безопасные с точки зрения прочности, колебания, негативно сказываются на здоровье людей. Их допустимые значения регламентируются соответствующими санитарными нормами.

Работы, относящиеся к колебаниям трубопровода, в основном посвящены определению его собственных частот. Сегодняшняя практика диктует необходимость определять так же параметры вибрации (амплитуды смещений, внутренние усилия, опорные реакции). Работ в данном направлении крайне мало, а существующие описывают частные случаи. Разработка достаточно

общей модели, описывают поведение трубопровода, является целью настоящей работы.

Как уже говорилось ранее в [1] для расчета параметров вибрации конструкций, обладающих существенно большей протяженностью вдоль некоторой оси, удобно воспользоваться квазиодномерной моделью в виде последовательно соединенных однотипных конечных элементов. Особенно удобно такое представление при анализе установившихся колебаний, так как оно позволяет перейти к ее квазистатическому варианту. В этом случае модель представляет совокупность абсолютно твердых и безынерционных элементов, соединенных между собой и неподвижным основанием упругими связями, каждая из которых порождает усилия определенной структуры (пропорциональные смещению, скорости, ускорению). При этом характеристики жесткости могут быть комплексными величинами. В частном случае, когда частота колебаний равна нулю, имеет место статический расчет параметров деформирования квазиодномерной модели.

В случае необходимости учета некоторого дополнительного фактора, усложняющего картину установившихся колебаний квазиодномерной модели, можно применить следующий подход [2]:



- проанализировать влияние этого фактора на модель (т.е. понять структуру дополнительных усилий); при этом дополнительные усилия условно разделить на три группы:

- к первой группе отнести слагаемые, прямо пропорциональные абсолютным и (или) относительным смещениям, скоростям и ускорениям. Действие слагаемых первой группы учесть модификацией модели, введя в нее дополнительные упругие связи (напомним, что зависимость дополнительного усилия от абсолютной скорости удобнее выполнить комплексностью инерционных характеристик, а зависимость от относительной скорости - комплексностью характеристик жесткости);

- выделить слагаемые, которые можно учесть коррекцией внешней нагрузки, прикладываемой к квазистатической модели (слагаемые второй группы);

- формализовать структуру слагаемых, учесть действие которых модификацией квазиоднородной модели не удалось (слагаемые третьей группы).

Очевидно, что при реализации такого подхода влияние слагаемых первых двух групп при расчете параметров вибрации модифицированной модели выполняется автоматически. При наличии слагаемых третьей группы следует воспользоваться методом последовательных приближений.

Проиллюстрируем реализацию предлагаемого подхода в процессе решения плоской задачи об установившихся колебаниях прямолинейного трубопровода с учетом протекающей в нем жидкости.

При исследовании изгибных колебаний прямой трубы с протекающей внутри жидкостью воспользуемся моделью в виде непризматической балки и гипотезой плоских сечений. В этом случае для анализа колебаний справедлива формула из [3]

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EJ(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = q(x, t), \quad (1)$$

где  $w(x, t)$  - уравнение упругой оси балки относительно ее недеформированного состояния при действии поперечной заданной нагрузки  $q(x, t)$ .

Пусть вдоль оси трубы будут неизменны ее изгибная жесткость  $EJ$ , масса единицы длины трубы  $m_1$  и масса объема жидкости  $m_2$ , заполняющего единицу длины трубы. В соответствии с принципом Даламбера возникающие при колебаниях силы инерции (рис.1) можно считать для балки поперечной нагрузкой, тогда

$$q(x, t) = -m_1 \frac{dv_1}{dt} - m_2 \frac{dv_2}{dt},$$

где  $v_1$  - абсолютная скорость элемента трубы, а  $v_2$  - абсолютная скорость элемента протекающей жидкости.

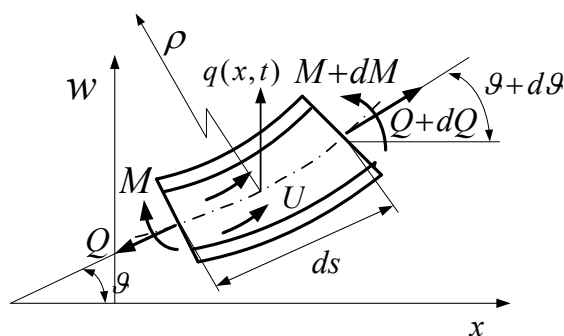


Рис.1

Для стационарного потока давление вдоль оси трубы не изменяется, а скорость движения жидкости  $U$  не зависит от колебаний трубы. Тогда инерционная нагрузка может быть записана в виде

$$q(x, t) = -m_1 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - m_2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - m_2 U^2 \frac{1}{\rho} - m_2 2U \dot{g}. \quad (2)$$

Здесь первое слагаемое - сила инерции элемента трубы, возникающая при его поперечных колебаниях; поскольку элемент жидкости совершает сложное движение (переносное движение со скоростью  $v_1$  элемента трубы, относительное - со скоростью  $U$ ), остальные слагаемые в (2) отражают его силы инерции - силу инерции переносного движения, нормальную составляющую силы инерции относительного движения (центробежная сила) и силу инерции Кориолиса, соответственно. При вычислении составляющих ускорения элемента жидкости учтено, что кривизна балки  $k = \frac{1}{\rho} \approx \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ ,

угол поворота элемента  $g = \frac{\partial w}{\partial x}$ , а его угловая

$$\text{скорость } \dot{g} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t}.$$

Подставив (2) в (1), получим дифференциальное уравнение поперечных колебаний оси трубопровода относительно начального прямолинейного положения:

$$EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (m_1 + m_2) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + m_2 U^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + m_2 2U \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} = 0. \quad (3.a)$$

В нашем случае это выражение удобнее представить в виде

$$EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (m_1 + m_2) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + m_2 U^2 \frac{1}{\rho} + m_2 2U \dot{g} = 0. \quad (3.б)$$

Анализ полученного выражения позволяет сделать следующие выводы:

- для расчета параметров установившихся колебаний трубопровода можно воспользоваться плоским вариантом прямолинейной квазидономерной модели из [1, 4];

- действие на модель дополнительных усилий второй группы (сила инерции переносного движения элемента жидкости и сила инерции Кориолиса), следует учесть модификацией модели. Так изменение масс элементов модели на величины масс соответствующих элементов жидкости приведет к коррекции величины соответствующей инерционной характеристики  $i$ , как следствие, к коррекции отрицательной жесткости соответствующих упругих опор. Учет сил инерции Кориолиса потребует введения дополнительных упругих опор отрицательной жесткости, обладающих специфическими свойствами (угол поворота поперечного сечения должен вызывать пропорциональную ему поперечную силу; при этом зависимость силы не от угла поворота, а от угловой скорости, приведет к появлению мнимой части значения соответствующей инерционной характеристики  $i$ , как следствие, мнимой части жесткости соответствующей упругой опоры);

- действие слагаемого, содержащего радиус кривизны нейтральной оси прямолинейного трубопровода, зависит от пока неизвестных формы и амплитуды ее колебаний. Выполнив расчет без учета действия этого слагаемого, можно получить неизвестные величины в первом приближении. По этим величинам следует рассчитать величины дополнительных усилий, приложив которые в качестве дополнительной внешней нагрузки к модифицированной модели, можно выполнить расчет второго приближения. Сравнение результатов приближений позволит сделать вывод о необходимости выполнения следующих приближений.

В случае пространственно-криволинейной оси трубопровода следует обобщить рассмотренную ситуацию.

На первом этапе оценивается изменение положения нейтральной оси трубопровода, обусловленное протеканием жидкости. Известная начальная кривизна оси трубопровода позволит вычислить значения радиусов кривизны вдоль нее. По этим значениям для элементов дискретной модели вычисляются слагаемые квазистатической нагрузки, содержащие радиус кривизны нейтральной оси. Кроме этого, наличие жидкости приведет к изменению весовой нагрузки, действующей на элементы конечно-элементной модели. Выполнив соответствующий расчет параметров равновесия трубопровода (например, по программе [4]) можно откорректировать положение его нейтральной оси. При существенности влияния возможно потребуются сделать несколько приближений. Отметим, что переход к конечно-элементной модели трубопровода позволяет автоматически учитывать переменность его сечения, так как указанная переменность приводит просто к неодинаковости элементов модели (точнее - их инерционно-жесткостных характеристик). Соображение, которым следует руководствоваться при подготовке некоторых исходных данных для элементов модели (инерционных характеристик и скорости протекания жидкости внутри каждого их них) - постоянство расхода протекающей жидкости.

Во-вторых, следует модифицировать конечно-элементную модель из [1, 4], увеличив массу элемента модели на величину массы протекающей жидкости, а так же введя в нее на нейтральной оси каждого элемента дополнительный комплекс из двух упругих опор отрицательной жесткости, обладающих специфическими свойствами (угол поворота поперечного сечения модели вокруг оси  $b$  должен вызывать пропорциональную ему поперечную силу  $R_n$ , направленную вдоль оси  $n$ ; угол поворота поперечного сечения модели вокруг оси  $n$  должен вызывать пропорциональную ему поперечную силу  $R_b$ , направленную вдоль оси  $b$ ). В таком случае в алгоритм расчета из [1,4] следует включить дополнительный комплект формул, учитывающий изменение парциальных откликов (ПО) и парциальных параметров (ПП) при прохождении этих опор. Вывод соответствующего комплекта формул авторами выполнен.

В качестве иллюстрации рассмотрим сначала прохождение опоры, ориентированной вдоль главной нормали, сила упругости которой пропорциональна углу поворота вокруг бинормали.

На первом этапе рассмотрим изменение ПО при приложении единичной силы  $N_n = 1$ , направленной вдоль главной нормали  $n$ . В этом случае в опорном сечении на левую парциальную систему кроме силы  $N_n = 1$  будет действовать направленная в противоположную сторону опорная реакция  $R_1$  (см. рис.2); ее величина пропорциональна углу поворота поперечного сечения на этой опоре вокруг бинормали  $b$ , т.е. соответствующему ПО.

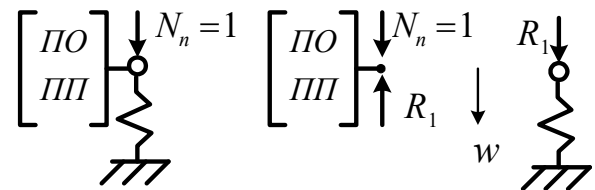


Рис.2

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$B'_{bn} = B_{bn} (N_n - R_1); \quad \text{где} \quad R_1 = S \cdot B'_{bn};$$

$$S = -m_2 2U, \quad \text{а } m_2 - \text{масса элемента жидкости, } U - \text{скорость ее протекания.}$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПО будет:

$$\text{а) } B'_{bn} = \frac{B_{bn}}{1 + B_{bn} S};$$

$$\text{б) } R_1 = S \cdot B'_{bn};$$

$$\text{в) } A'_{nn} = A_{nn} (1 - R_1);$$

г) формулы для вычисления всех остальных ПО ( $A'_{bn}; A'_{\tau n}; B'_{bn}; B'_{\tau n}$  имеют структуру формулы пункта в).

На втором и третьем этапах рассмотрим изменение ПО при приложении единичной поперечной силы  $N_b = 1$ , направленной вдоль бинормали  $b$ , и единичной продольной силы  $N_\tau = 1$ , направленной вдоль нейтральной оси.

На четвертом этапе рассмотрим изменение ПО при приложении единичного момента  $M_b = 1$ , направленного вдоль бинормали. В этом случае в опорном сечении на левую частичную систему кроме момента  $M_b = 1$  будет действовать направленная вдоль главной нормали опорная реакция  $R_4$  (см. рис.3); ее величина пропорциональна углу поворота поперечного сечения на этой опоре вокруг бинормали, т.е. соответствующему ПО.

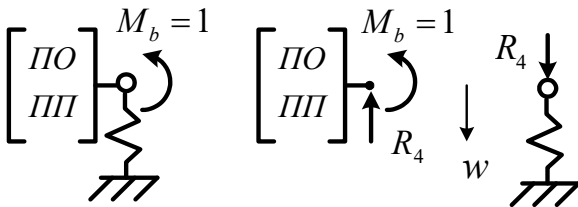


Рис.3

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$D'_{bb} = D_{bb}M_b - B_{bn}R_4; \text{ где } R_4 = S \cdot D'_{bb}.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПО будет:

а)  $D'_{bb} = \frac{D_{bb}}{1 + B_{bn}S};$

б)  $R_4 = S \cdot D'_{bb};$

в)  $C'_{nb} = C_{nb} - A_{nn}R_4;$

г)  $C'_{bb} = C_{bb} - A_{bn}R_4;$

д)  $C'_{\tau b} = C_{\tau b} - A_{\tau n}R_4;$

е)  $D'_{nb} = D_{nb} - B_{nn}R_4;$

ж)  $D'_{\tau b} = D_{\tau b} - B_{\tau n}R_4;$

На пятом и шестом этапах рассмотрим изменение ПО при приложении единичного момента  $M_n = 1$ , направленного вдоль главной нормали, и изменение ПО при приложении единичного момента  $M_\tau = 1$ , направленного вдоль продольной оси.

На седьмом этапе рассмотрим изменение ПП, отражающих действие на частичную систему

внешней нагрузки. В этом случае в опорном сечении на левую частичную систему будет действовать направленная вдоль главной нормали опорная реакция  $R_7$  (см. рис.4); ее величина пропорциональна углу поворота поперечного сечения на этой опоре вокруг бинормали (т.е. соответствующему ПП).

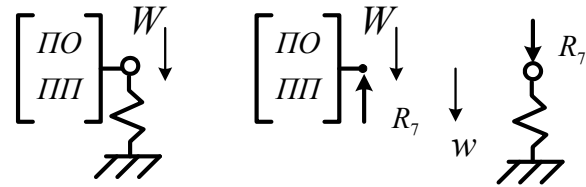


Рис.4

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$Q'_b = Q_b - B_{bn}R_7; \text{ где } R_7 = S \cdot Q'_b.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПП будет:

а)  $Q'_b = \frac{Q_b}{1 + B_{bn}S};$

б)  $R_7 = S \cdot Q'_b;$

в)  $W'_n = W_n - A_{nn}R_7;$

г)  $W'_b = W_b - A_{bn}R_7;$

д)  $W'_\tau = W_\tau - A_{\tau n}R_7;$

е)  $Q'_n = Q_n - B_{nn}R_7;$

ж)  $Q'_\tau = Q_\tau - B_{\tau n}R_7;$

Далее следует рассмотрение прохождения опоры, ориентированной вдоль бинормали, сила упругости которой пропорциональна углу поворота вокруг главной нормали; оно выполняется аналогично рассмотренному выше.

Замечание: если трубопровод имеет переменное поперечное сечение, то учет постоянства расхода жидкости позволяет для каждого конечного элемента квазиодномерной модели рассчитать величины  $m_2$  (масса элемента жидкости) и  $U$  (скорость ее протекания), которые позволят откорректировать массы элементов модели, а так же вычислить жесткости  $S = -m_2 2U$  соответствующих упругих опор отрицательной жесткости.

В качестве наиболее простой иллюстрации возможностей предложенного подхода была разработана программа «Koriolis» для расчета параметров вибрации прямого трубопровода постоянного поперечного сечения с протекающей жидкостью; трубопровод опирается на две произвольно расположенные упругие опоры, вибрация вызывается действием поперечной силы

(либо изгибающего момента) с произвольной точкой приложения.

Расчетное исследование тестового характера выполним на примере, исходные данные которого близки к процессам в судостроении (например, протекание воды в трубках охлаждения котла).

По участку трубопровода с шарнирными опорами на концах (см. рис.5), течет с постоянной скоростью  $U$  идеальная несжимаемая жидкость (вода). Средний диаметр сечения трубопровода  $D = 0.02 м$ , толщина стенки трубопровода  $\delta = 0.001 м$ , длина участка  $l = 1 м$ , плотность материала  $\rho_1 = 8900 кг / м^3$  (медь), модуль упругости  $E = 1 \cdot 10^5 МПа$ . Масса жидкости  $\rho_2 = 1000 кг / м^3$  (вода). Определить первые две частоты поперечных колебаний трубопровода с покоящейся и протекающей жидкостью без учета действия статических сил веса.

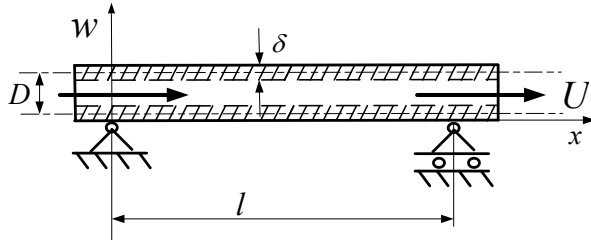


Рис.5

В [3] для прямолинейного трубопровода с протекающей идеальной несжимаемой жидкостью, опертого по концам на шарнирные опоры, приведено решение методом Бубнова-Галеркина, позволяющее найти две первые частоты свободных колебаний трубопровода и значение критической скорости.

Критическая скорость протекания жидкости возникает при равенстве нулю одной из частот колебаний, что имеет место при выполнении условия из [3]:

$$4\left(\frac{\pi}{l}\right)^4 \left[\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - c\right] \left[4\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - c\right] = 0,$$

где  $c = \frac{m_2 U_{кр}^2}{EJ}$ ,

$m_2 = \rho_2 \pi (D - \delta)^2 / 4 = 0.098 кг / м$  - масса единицы длины жидкости,

$EJ = 5,495 \cdot 10^4 Н / м^2$  - жесткость трубы на изгиб.

Отсюда значение минимальной критической скорости будет

$$U_{кр} = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{EJ}{m_2}} = 110.8 м / сек .$$

Результаты решения задачи по формулам из [3]:  
при  $U = 0$ :

$$\omega_1 = 190.8 рад / сек; \omega_2 = 763,2 рад / сек ;$$

при  $U = 10 м / сек$  :

$$\omega_1 = 189.9 рад / сек; \omega_2 = 762.5 рад / сек ;$$

при  $U = 50 м / сек$  :

$$\omega_1 = 166.4 рад / сек; \omega_2 = 746.8 рад / сек ;$$

при  $U = 80 м / сек$  :

$$\omega_1 = 120.6 рад / сек; \omega_2 = 720.2 рад / сек .$$

Заметим, что последние значения скорости взяты только для доказательства работоспособности предлагаемых модели, алгоритма и программы расчета, так как не наблюдаются при работе реальных охлаждающих установок.

Результаты расчетов, выполненных по разработанной программе «Koriolis»:

при  $U = 0$ :

$$\omega_1 = 190 рад / сек; \omega_2 = 763 рад / сек ;$$

при  $U = 10 м / сек$  :

$$\omega_1 = 190 рад / сек; \omega_2 = 763 рад / сек ;$$

при  $U = 50 м / сек$  :

$$\omega_1 = 189 рад / сек; \omega_2 = 764 рад / сек ;$$

при  $U = 80 м / сек$  :

$$\omega_1 = 187 рад / сек; \omega_2 = 766 рад / сек .$$

Сравнение полученных результатов показывает их достаточно хорошее совпадение при скоростях движения жидкости существенно ниже критической. При значительных скоростях, по мнению авторов, начинает сказываться влияние слагаемого, обусловленного центробежной силой инерции (не учитывается в рамках линейной модели). Для проверки сделанного предположения в решении задачи методом Бубнова – Галеркина было убрано слагаемое, обусловленное центробежной силой инерции. Результаты решения задачи по откорректированным формулам из [3] оказались следующими:

при  $U = 0$ :

$$\omega_1 = 190.8 рад / сек; \omega_2 = 763,2 рад / сек ;$$

при  $U = 10 м / сек$  :

$$\omega_1 = 190.7 рад / сек; \omega_2 = 763.4 рад / сек ;$$

при  $U = 50 м / сек$  :

$$\omega_1 = 189.4 рад / сек; \omega_2 = 769.8 рад / сек ;$$



при  $U = 80 \text{ м/сек}$  :

$$\omega_1 = 187.3 \text{ рад/сек}; \omega_2 = 777.4 \text{ рад/сек}.$$

Они практически совпали с результатами расчетов по разработанной программе, что подтверждает правильность сделанного предположения.

Теперь исследуем вопрос о влиянии слагаемого, обусловленного кривизной формы колебаний (центробежной силой инерции). Поскольку кривизна формы колебаний зависит от неизвестной заранее амплитуды колебаний, для выполнения расчета параметров вибрации воспользуемся методом последовательных приближений.

Для этого на первом этапе по разработанной программе выполним серию из четырех расчетов: два из них на частотах ниже и выше первой резонансной частоты

$$\omega_I = 0.75\omega_1 = 145 \text{ рад/сек};$$

$$\omega_{II} = 1.25\omega_1 = 245 \text{ рад/сек},$$

а другие два - на частотах ниже и выше второй резонансной частоты

$$\omega_{III} = 0.75\omega_2 = 572 \text{ рад/сек};$$

$$\omega_{IV} = 1.25\omega_2 = 954 \text{ рад/сек};$$

при этом скорость движения жидкости  $U = 10 \text{ м/сек}$ , а вынуждающее усилие (поперечная сила  $Q = 10 \text{ Н}$ ) приложено на удалении  $x = 0.25 \text{ м}$  от левой опоры.

По результатам первых двух расчетов форма изгибных колебаний трубопровода представляет собой синусоиду, ордината которой изменяется по закону  $w_i(x) = W_i \sin(\pi x / l); i = I, II$ , где  $W_i$  - максимальные поперечные смещения оси трубопровода. По результатам вторых двух расчетов форма изгибных колебаний трубопровода представляет собой синусоиду, ордината которой изменяется по закону  $w_i(x) = W_i \sin(2\pi x / l); i = III, IV$ . Значения максимальных поперечных смещений получились:

$$w_I = 1.09 \cdot 10^{-3} \text{ м}; w_{II} = 0.721 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$w_{III} = 1.33 \cdot 10^{-4} \text{ м}; w_{IV} = 0.809 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

соответственно. Воспользовавшись формулой

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{y''}{[1+(y')^2]^{3/2}}$$

для вычисления кривизны плоской кривой  $y = y(x)$ , вычислим ее значения для каждой полуволны синусоиды в семи равноудаленных друг от друга точках. Полученные значения позволяют рассчитать дополнительные динамические усилия

$$F_i = \frac{m_{2i} U^2}{\rho} = m_{2i} U^2 k; \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $n$  - число точек, в которых расположены элементы жидкости массами  $m_{2i}$ .

В качестве примера в таблицах 1 и 2 приведены величины дополнительных динамических усилий (с учетом симметрии распределения для первой формы колебаний приведены значения только для ее первой половины, для второй формы колебаний значения приведены только для первой четверти; размерность частоты – рад/сек, силы – в Н).

Таблица 1

частота	$x=L/8$	$x=L/4$	$x=3L/8$	$x=L/2$
145	0,01408	0.02601	0.03399	0,03679
245	0,01113	0,02056	0,02687	0,02908

Таблица 2

частота	$x=L/16$	$x=L/8$	$x=3L/16$	$x=L/4$
572	0,00357	0,00659	0,00861	0,00932
954	0,00217	0,00401	0,00524	0,00567

Добавив к приложенной ранее нагрузке ( $Q = 10 \text{ Н}$ ) дополнительные динамические усилия, вновь рассчитаем параметры изгибной вибрации оси трубопровода. Значения максимальных отклонений второго приближения получились равными  $w_I = 1.08 \cdot 10^{-3} \text{ м}; w_{II} = 8.18 \cdot 10^{-4} \text{ м};$

$$w_{III} = 1.33 \cdot 10^{-4} \text{ м}; w_{IV} = 0.806 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Сравнив значения амплитуд вибрации, полученных во втором приближении, с соответствующими значениями первого расчета можно сделать вывод о пренебрежимо малом влиянии центробежных сил при скорости движения жидкости  $U = 10 \text{ м/сек}$ .

Повторим расчеты для скорости движения жидкости  $U = 50 \text{ м/сек}$ , оставив прежними значения частот  $\omega_I; \omega_{II}; \omega_{III}; \omega_{IV}$ .

Значения максимальных поперечных смещений получились, соответственно:

$$w_I = 1.07 \cdot 10^{-3} \text{ м}; w_{II} = 0.797 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$w_{III} = 1.29 \cdot 10^{-4} \text{ м}; w_{IV} = 0.811 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Поскольку вычисленные значения практически не отличаются от полученных выше, а скорость движения жидкости в 5 раз выше, дополнительные динамические усилия будут в 25 раз больше усилий из таблиц 1 и 2.

Добавив к приложенной ранее нагрузке дополнительные динамические усилия, вновь рассчитаем параметры изгибной вибрации оси трубопровода. Заметим, что в зарезонансных областях, в силу смены фазы колебаний, центробежные усилия следует направить в другую сторону. Значения максимальных отклонений в первом, втором и последующих приближениях приведены в таблице 3.

Таблица 3

№	1	2	3	4
$w_I$	1.07e-3	1.61e-3	1.91e-3	2.07e-3
$w_{II}$	0.797e-3	0.507e-3	0.626e-3	0.578e-3
$w_{III}$	1.29e-4	1.49e-4	1.52e-4	1.52e-4
$w_{IV}$	0.811e-4	0.73e-4	0.738e-4	0.737e-4

Сравнив значения амплитуд вибрации, полученных в процессе последовательных приближений, констатируем достаточно хорошую сходимость результатов (особенно – на более высоких частотах). При желании можно выполнить и последующие приближения.

Отметим, что повышение значений амплитуд колебаний в дорезонансных областях и их уменьшение в резонансных областях свидетельствует о смещении резонансных частот в сторону начала координат. Отмеченная тенденция согласуется с результатами, полученными по формулам из [3].

Для получения количественной оценки влияния центробежных сил инерции на снижение первой собственной частоты была выполнена серия дополнительных расчетов. При организации последовательных приближений этом случае был применен иной подход. Суть подхода в том, что действие центробежных сил инерции может быть учтено (при наперед заданной форме колебаний), коррекцией сил инерции переносного движения элементов жидкости.

Для иллюстрации сказанного запишем выражение для амплитудного значения силы инерции переносного движения  $i$ -го элемента жидкости как

$$F_i^{nep} = m_{2i} a_i^{nep} = -m_{2i} w_i \omega^2,$$

где  $m_{2i}$  - масса  $i$ -го элемента жидкости,  $a_i^{nep}$  - амплитуда ускорения переносного движения элемента жидкости (амплитуда ускорения элемента трубопровода),  $w_i$  - амплитуда переносного движения элемента жидкости (амплитуда смещения элемента трубопровода),  $\omega$  - частота вынуждающего воздействия.

Выражение для амплитудного значения центробежной силы инерции  $i$ -го элемента жидкости при изгибе трубопровода по первой форме колебания в  $j$ -м приближении может быть записана как

$$F_i^{чб} = m_{2i} a_i^{чб} \alpha_j = m_{2i} k_i U^2 \alpha_j = -m_{2i} U^2 w_i \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \alpha_j,$$

где  $a_i^{чб}$  - амплитуда центробежного ускорения элемента жидкости,  $k_i$  - кривизна в  $i$ -ой точке нейтральной оси,  $U$  - скорость протекания жидкости,  $\alpha_j$  - коэффициент, равный отношению амплитуды наибольшего смещения в  $j$ -м приближении к

соответствующей амплитуде в  $(j-1)$  приближении. При записи учтено, что кривизна кривой с достаточной для практики точностью равна второй производной от функции, описывающей эту кривую.

Тогда выражение для их суммарного воздействия может быть записано в форме

$$F_i^{nep} + F_i^{чб} = -m_{2i} w_i \omega^2 \left[ 1 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \left(\frac{U}{\omega}\right)^2 \alpha_j \right] = F_i^{nep} \left[ 1 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \left(\frac{U}{\omega}\right)^2 \alpha_j \right].$$

Поскольку учет сил инерции переносного движения элементов жидкости выполняется программой «Koriolis» автоматически, то соответствующая коррекция массы (в программе – плотности жидкости) позволит так же автоматически выполнить учет центробежных сил инерции в  $j$ -м приближении. При выполнении расчета нулевого приближения следует принять  $\alpha_0 = 0$  (действие центробежных силы инерции не учитывается), в первом приближении следует принять  $\alpha_1 = 1$ . Вычисленные в нулевом и первом приближениях амплитуды колебаний  $w_i(0)$  и  $w_i(1)$  позволят

$$\text{найти отношение амплитуд } \alpha_2 = \frac{w_i(1)}{w_i(0)}.$$

Заметим, что при колебании оси трубопровода по второй форме в первой круглой скобке должен появиться коэффициент «2».

Выполненные расчеты показали, что добавление центробежных сил, пропорциональных кривизне траектории (в свою очередь, пропорциональной амплитуде колебаний элементов модели), которое было учтено на конкретной частоте вынуждающего воздействия некоторым увеличением инерционности элементов жидкости, привело к снижению значений собственных частот модели. Для нашего случая смена фазы колебаний (признак перехода через резонанс) произошли на частотах:

при  $U = 0 \text{ м/сек}$  :

$$\omega_1 = 190.8 \text{ рад/сек}; \omega_2 = 763.2 \text{ рад/сек};$$

при  $U = 10 \text{ м/сек}$  :

$$\omega_1 = 190.7 \text{ рад/сек}; \omega_2 = 763.4 \text{ рад/сек};$$

при  $U = 50 \text{ м/сек}$  :

$$\omega_1 = 163.3 \text{ рад/сек}; \omega_2 = 759.1 \text{ рад/сек};$$

при  $U = 80 \text{ м/сек}$  :

$$\omega_1 = 114.3 \text{ рад/сек}; \omega_2 = 755.3 \text{ рад/сек}.$$

Отличие приведенных значений, полученных по формулам из [3], составило менее 2%.

На рисунке 6 приведены графики сходимости процесса последовательных приближений для принятых значений частот вынуждающего воздействия (график А -  $\omega = \omega_I$ ; график Б -  $\omega = \omega_{II}$ ; график В -  $\omega = \omega_{III}$ ; график Г -  $\omega = \omega_{IV}$ ).

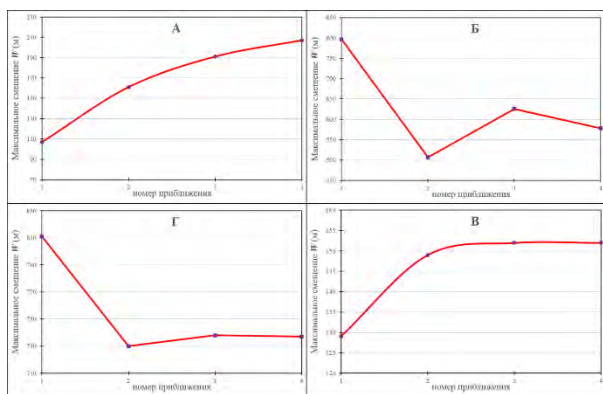


Рис. 6.

Для нахождения значения критической скорости протекания жидкости следует получить зависимость амплитуды максимального смещения оси трубопровода от скорости протекания жидкости; ее анализ позволил определить, при каких значениях скорости жидкости начнут возникать не устраивающие нас амплитуды вибрации.

Напомним, что при критической скорости протекания жидкости любые незначительные отклонения оси трубопровода от прямой линии должны вызывать ее значительные отклонения; иными словами, должно быть равно нулю значение первой собственной частоты трубопровода.

В таком случае примем частоту вынуждающей силы незначительной (например,  $\omega = 0,1 \text{ рад/сек}$ ) и выполним расчеты для ряда значений скорости протекания жидкости ( $U = 10; 30; 50; 70; 90; 110 \text{ м/сек}$ ). Результаты расчетов, выполненных на каждой скорости протекания жидкости методом последовательных приближений (способом коррекции дополнительной нагрузки), приведены на рисунке 7.

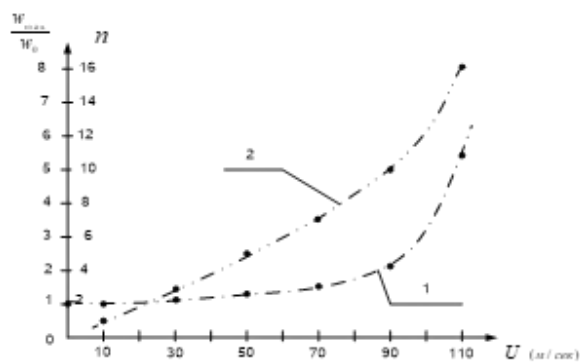


Рис. 7

На рисунке линия 1 соединяет значения относительных наибольших смещений (отношение наибольшего смещения при рассматриваемом значении скорости протекания  $W_{\max}$  к наибольшему смещению при покоящейся жидкости  $W_0$ ).

Анализ кривой 1 показывает, что с приближением скорости протекания жидкости к значению  $U = 110 \text{ м/сек}$  имеет место резкое возрастание смещения оси трубопровода; отмеченное поведение достаточно хорошо согласуется с расчетом критической скорости по формуле из [3].

Линия 2 соединяет точки с числами последовательных приближений ( $n$ ), выполненных на принятых скоростях протекания, которые понадобилось проделать, пока точность совпадения результатов приближений не составила 3%.

Очевидно, что приближение скорости движения жидкости к критическому значению, вызывает увеличение центробежных сил инерции, что приводит к необходимости выполнять несколько большее количество приближений (см. линию 2).

Заметим, что выполнять расчеты при скоростях, близких к критической, не имеет смысла, так как в силу неустойчивости моделируемого физического процесса результаты расчета должны носить неустойчивый характер.

### Литература

1. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Квазиодномерные модели для анализа параметров вибрации судового корпуса на ранних стадиях его проектирования. СПб, Моринтех, 2019 г., с. 44-51.
2. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Модификация инерционно-жесткостных характеристик модели как путь решения задач о ее установившихся колебаниях. СПб, Моринтех, 2020 г., с.12-20.
3. Светлицкий В.А., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. М., Высшая школа, 1979 г.
4. <http://www.d-nik.de> PC-Welt (Эффективное решение. Расчет изогнутых балок и рам.). 08.11.2020

### References

1. Melkonian A.L., Nikolaev D.A. Kvaziodnomernie modeli dlia analiza parametrov vibratsii sudovogo korpusa na rannih stadiakh ego proektirovaniya [Quasi-one-dimensional models for the analysis of ship hull vibration parameters at early stages of its design]. SPb, Morintex, 2019 g., p. 44-51.
2. Melkonian A.L., Nikolaev D.A. Modifikatsiya inetsionno-gestkostnih harakteristik modeli kak put resheniya zadach o ee ustanovivshisya kolebaniyah (Modification of the inertial-stiffness characteristics of the model as a way to solve problem of its steady-state oscillation). SPb, Morintex, 2019 g., p. 12-20.
3. Svetlitskiy V.A., Stasemko I.V. Sbornik zadach po teorii kolebaniy (Collection of problems on the theory of vibrations), M, Visshaya shkola, 1979 g.
4. <http://www.d-nik.de> PC-Welt (Effectivnoe reshenie. Raschet izognutih balok i ram [Effective solution for curved beams and frames]). 08.11.2020.

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

**Армен Леонович Мелконян**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, тел. (911) 911-64-25; e-mail: mel1950@mail.ru

**Дмитрий Александрович Николаев**, кандидат технических наук, пенсионер, e-mail: D.Nikolaevl@d-nik.de

**Михаил Владимирович Чуклин**, бакалавр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, тел. (906) 251-05-32, e-mail: chuklin@mail.ru

**Armen L. Melkonian**, Ph.D.(Eng), professor, professor of theoretical mechanics and material strength department, Saint-Petersburg State Marine Technical University, 3, Lotsmanskaya str., 190121 St. Petersburg, The Russian Federation, phone number (911) 911-64-25, e-mail: mel1950@mail.ru

**Dmitry A. Nikolaev**, Ph.D.(Eng), a pensioner, e-mail: D.Nikolaevl@d-nik.de

**Mikael V. Chuklin**, bachelor, Saint-Petersburg State Marine Technical University, 3, Lotsmanskaya str., 190008 St. Petersburg, The Russian Federation, phone number (906) 251-05-32, e-mail: chuklin@mail.ru

Поступила в редакцию: 16.06.2020

Принята к публикации: 12.02.2021



## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.12.001.2:681.518

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.026

## Методика инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники и морской инфраструктуры

А.В. Алексеев<sup>1</sup> e-mail: iapbgks@bk.ru<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В развитие Полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации объектов морской техники рассмотрена математическая модель и методика инвариантной оценки качества объектов исследовательского проектирования и их систем. Обобщены свойства Полимодельного квалиметрического метода, сравнительные свойства алгоритмов агрегирования показателей качества и предложена методика инвариантной оценки качества и эффективности, а также системной оптимизации объектов морской техники и морской инфраструктуры как объектов исследовательского проектирования. Разработанные основные положения методики на примере объекта морской техники класса «Корабль» позволяют количественно оценивать качество, эффективность, конкурентную способность и перспективность развития в условиях лавинообразного роста сложности современных объектов морской техники, ужесточения требований к качеству процессов их создания и эксплуатации на всех этапах жизненного цикла. Это позволяет на принципиально новом уровне решать задачи концептуального, исследовательского и конструкторско-технологического обоснования эффективных и оптимальных проектных и эксплуатационных решений за счет специфики инвариантного моделирования объектов.

**Ключевые слова:** полимодельный квалиметрический метод, исследовательское проектирование, методика, гармонический алгоритм агрегирования, коэффициент вариации, погрешность оценивания.

## Method of invariant assessment of quality and efficiency marine engineering and marine infrastructure facilities

Anatoly V. Alekseev<sup>1</sup> e-mail: iapbgks@bk.ru<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** In the development of a multi-Model qualimetric method for system optimization of marine engineering objects, a mathematical model and a method for invariant assessment of the quality of research design objects and their systems are considered. The properties of the Polymodel qualimetric method, comparative properties of algorithms for aggregating quality indicators are generalized, and a method for invariant assessment of quality and efficiency, as well as system optimization of marine engineering and marine infrastructure objects as research design objects is proposed. The developed basic provisions of the methodology on the example of a Ship-class marine equipment object allow us to quantify the quality, efficiency, competitive ability and prospects of development in the conditions of an avalanche of increasing complexity of modern marine equipment objects, stricter requirements for the quality of their creation and operation processes at all stages of the life cycle. This allows us to solve the problems of conceptual, research and design-technological justification of effective and optimal design and operational solutions at a fundamentally new level due to the specifics of invariant object modeling.

**Key words:** polymodel qualimetric method, research design, methodology, harmonic aggregation algorithm, coefficient of variation, estimation error.

## Введение

В развитие Полимодельного квалиметрического метода (ПКМ) системной оптимизации объектов морской техники и морской инфраструктуры (ОМТИ) как объектов исследовательского проектирования (ОИП) [1], ниже излагаются основные положения методики инвариантной (неизменной от специфики ОИП) оценки комплексного показателя проектного качества отдельного ОИП (КПК) и их системы (ПСПК) по соответствующим моделям (1) и (2) в табл. 1 [1]. Методика позволяет также оценивать эффективность (КПЭ) ОИП и ПСПЭ для системы ОИП, как степень реализации КПК и ПСПК, а также количественно оценивать конкурентную способность (КС) ОИП и их системы (КСС), перспективность развития (ПР) ОИП и их системы (ПРС).

Эти важнейшие системные возможности имеют особую значимость для стадий создания и эксплуатации объектов исследовательского проектирования (ИП), под которым понимается

комплекс научно-исследовательских и проектных работ, проводимых в отличие от НИОКР в сжатые сроки и при ограниченных ресурсных затратах в организационных формах типа «проект», аван-проект, «стартап» с целью ускоренного освоения новых технологий, обоснования инновационных и инвестиционных предложений и решений на основе использования высококвалифицированных кадров и ранее накопленного научно-технического и технологического потенциала предприятий, организаций, компаний, инициативных групп и т.п.

Особую актуальность и значимость ИП приобретает в условиях лавинообразного роста технологических возможностей, сложности современных ОИП типа объектов морской техники (ОМТ), ужесточения требований к качеству процессов управления их созданием и эксплуатацией на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) ОИП, и, особенно, ЖЦ систем (ЖЦС) [2-4].

В этих условиях одной из самых востребованных поисковых концепций традиционно является парадигма системного подхода. Однако, для

количественного обоснования концептуальных, исследовательских и проектных предложений и решений с учетом роста проблем сложности методический аппарат существенно сокращается. Более того, разработка моделей, например, функционирования ОИП практически не представляется возможной, особенно, с учетом все более возрастающей роли в контуре управления подобными системами операторов с их субъективными свойствами как позитивными (при ограниченной «пропускной» способности), так и негативными (с одной стороны, многочисленными, а с другой - принципиально не формализуемыми).

Самой перспективной сегодня методологией, позволяющей как учитывать тенденцию роста проблемы сложности, так и количественно оценивать качество и эффективность разнородных ОИП, следует считать **методологию измерения качества (квалиметрию)**, получившей свое развитие в начале XX века с метода сводных показателей А.Н. Крылова и незаслуженно забытой во второй его половине, пожалуй, из-за «страха» цифр системного значения (происхождения), связанного с качеством управления.

В настоящее время эти методы активно развиваются [2-11], включая предложенный в [1] **Полимоделный квалиметрический метод (ПКМ)** системной оптимизации ОИП, имеющий *обобщенный системный характер* и, как следствие, *инвариантный к специфике решаемых задач*.

В развитие [1] представляется актуальным в данной статье рассмотреть математическую модель и наиболее значимые свойства ПКМ системной оптимизации ОИП типа ОМТИ, а также методику его использования в современных условиях.

### 1. Математическая модель инвариантной оценки качества ОИП и их систем

В основе ПКМ и его математической модели лежит использование введенного в рассмотрение обобщенного оператора свертки критериев и соответствующих показателей качества (ПК). Это позволило в развитие ранее проведенного комплекса исследований представить математическую модель агрегирования векторных критериев оценки качества системы ОИП в виде базовых моделей агрегированного ПК отдельного ОИП (КПК)  $Q_k$  и их системы (ПСПК)  $Q$  типа [1]

$$Q_k = C_{k,M}^{t_M} \{w_m, C_{m,G}^{t_G} [w_g, C_{g,N}^{t_N}(w_n, q_n)]\}, \quad (1)$$

$$Q = C_P^{t_P} \{w_p, C_{p,R}^{t_R} [w_r, C_{r,K}^{t_K}(w_k, Q_k)]\}, \quad (2)$$

где:  $C_{g,N}^{t_N}(w_n, q_n)$  – обобщенный оператор свертки ЧПК  $q_n$  с общим их числом  $N$  в  $g$ -ый ГПК  $C_{g,N}^{t_N}(\dots)$  по алгоритму типа  $t_g$ : для (5.1) [1] - аддитивного (линейного) алгоритма (А), впервые предложенного А.Н. Крыловым; для (5.2) [1] - мультипликативного алгоритма (М); для (5.3) [1] - гармонического алгоритма (Г) и других алгоритмов свертки (первый уровень свертки показателей качества ОИП);

$C_{m,G}^{t_G}[w_g, C_{g,N}^{t_N}(\dots)]$  – обобщенный оператор свертки при соответствующих индексах критериальной значимости  $w_g$  ГПК с их общим числом  $G$  в  $m$ -ый модельный (МПК) показатель

качества (второй уровень свертки ПК ОИП);

$C_{k,M}^{t_M}\{w_m, C_{m,G}^{t_G}[\dots]\}$  - обобщенный оператор свертки МПК в  $k$ -ый агрегированный комплексный, (интегральный, обобщенный) показатель (КПК) качества (четвертый уровень свертки ПК ОИП).

Для системы ОИП в модели (2) приняты следующие обозначения:

$C_{r,K}^{t_K}(w_k, Q_k)$  – обобщенный оператор свертки КПК  $Q_k$  с общим их числом  $K$  в  $r$ -ый агрегированный АСПК однородных ОИП по алгоритму типа  $t_K$  (пятый уровень свертки ПК ОИП);

$C_{p,R}^{t_R}[w_r, C_{r,K}^{t_K}(\dots)]$  – обобщенный оператор свертки АСПК  $C_{r,K}^{t_K}(\dots)$  с общим их числом  $R$  в  $p$ -ый модельный системный показатель качества (МСПК) разнородных либо однородных ОИ по алгоритму типа  $t_K$  (шестой уровень свертки ПК ОИП);

$C_P^{t_P}\{w_p, C_{p,R}^{t_R}[\dots]\}$  - обобщенный оператор свертки МСПК  $C_{p,R}^{t_R}[\dots]$  с общим их числом  $P$  в полимоделный системный показатель качества (ПСПК) системы ОИП по алгоритму типа  $t_P$  (седьмой уровень свертки ПК ОИП).

Опыт выполнения комплексных оценок качества и их использования при исследовательском проектировании с применением представленного комплекса математических моделей (1) - (2) [3-8] показал высокую **информативность и когнитивность** [3-4] (возможность добывания новых знаний) **получаемых данных**, явную **перспективность использования ПКМ** при анализе и синтезе **направлений концептуального и технологического развития, технического проектирования** [5-8] и соответствующих **маркетинговых исследований**.

Более того, **ценность количественных оценок системного характера**, получаемых при использовании представленного методологического аппарата полимоделного квалиметрического оценивания, синтеза и оптимизации сложных эргатических (человеко-машинных) систем, подтверждает его **безальтернативность** и тот факт, что системный анализ современных сложных ОИП типа ОМТИ, «цифровизация» их развития **без подобных количественных оценок** их качества и эффективности (степени реализации проектного качества) [10-13] **практически не возможен**.

С учетом критического роста стоимости риска **проектных решений без выполнения количественных оценок КПК и ПСПК** принятие ЛПР недостаточно обоснованных и неоптимальных проектных решений, соответствующих возможных проектных ошибок становится очевидной их **проектная бесперспективность и конкурентная несостоятельность**. Тем не менее, анализ конкурсных предложений на различных торговых площадках и соответствующие факты эту «печальную» практику подтверждает.

### 2. Свойства Полимоделного квалиметрического метода системной оптимизации ОИП

Использование данных моделей КПК и ПСПК позволяет практически для ОИП любой структуры и алгоритмов функционирования, а также их систем получить аналитическое выражение для количественной оценки проектного качества и

эффективности эксплуатации с возможностью последующего анализа, синтеза и оптимизации ОИП, включая ОМТИ, и их систем.

**Система агрегирования ПК** (1) - (2), которую можно условно назвать «Иерархической семиуровневой системой агрегирования ЧПК в ПСПК», **позволяет перейти** от множества ЧПК к **единому показателю** проектного качества системы ОИП (ПСПК), оцениваемого на этапе создания ОИП.

Что же касается стадии ЖЦ – эксплуатации, то в рамках и контексте выше рассматриваемой модели целесообразно говорить об **эффективности функционирования системы ОИП как меры (степени) реализации проектного качества ОИП (КПК и ПСПК) в процессе эксплуатации системы ОИП**, оцениваемой по аналогичным аналитическим моделям (1) – (2), но с **фактическими значениями ЧПК**, соответствующими условиям эксплуатации.

Так, введение в модель (1) и (2) **коэффициента (индекса) эффективности** по модели (6.3) [1], где в качестве  $q_{max}$  выбирается значение проектного значения ЧПК, позволит непосредственно количественно оценивать значение коэффициента эффективности ОИП и/или их системы. А, тем более, его непосредственно и непрерывно наблюдать (мониторить), контролировать в процессе эксплуатации с **целью** принятия **своевременных и обоснованных решений по обеспечению заданной эффективности эксплуатации ОИП**.

С учетом опыта проведенных многовариантных количественных оценок и использования комплексной математической модели (КММ) квалитметрической оценки, анализа и оптимизации (КАСО) ОИП, использования ПКМ системной оптимизации ОИП [1, 3-8, 10-13] представляется целесообразным отметить **ряд его важных свойств и характеристик**:

1. ПКМ системной оптимизации ОИП обладает **высокой практической значимостью**, т.к. позволяет в сравнении с другими немногочисленными методами оценивать, прежде всего, системные свойства и характеристики ОИП. Последнее обеспечено, в том числе, введением в Комплексную математическую модель квалитметрической оценки, анализа, синтеза и оптимизации ОИП (1) – (2) обобщенного (универсального) математического оператора свертки типа  $C_{g,N}^{t_n}(w_n, q_n)$ , который наряду с **инвариантностью** и **масштабируемостью алгоритмов** (1) и (2) обеспечивает **минимизацию информационной избыточности** представления и использования алгоритмических процедур.

2. ПКМ обладает **достаточно высокой методической достоверностью (точностью) и ценностью** получаемых системных данных, т.к. оперирует наиболее значимыми критериями системного оценивания качества ОИП в пределах реально достигаемой точности задания ЧПК.

3. ПКМ обладает **достаточно высокой статистической точностью (надежностью)**, т.к. при статистическом усреднении по ансамблю варьируемых значений из  $N$  ЧПК, как известно, коэффициент вариации (КВ) КПК и ПСПК уменьшаются обратно пропорционально  $\sqrt{N}$ , что обеспечивает, например, при  $N=15$  и КВ ЧПК порядка 10% низкое значение КВ КПК порядка 2,6%

4. ПКМ наиболее **перспективен при цифровом моделировании сложных ОИП**, т.к. построение аналитических функциональных моделей в этом случае практически не представляется возможным, а необходимость квалитметрического оценивания проектных решений существенно возрастает.

5. ПКМ позволяет использовать получаемые оценки КПК и ПСПК **в контуре обратной связи систем управления** практически любой структуры. Это обеспечивает универсальность использования и ожидаемую высокую результативность ПКМ для системной оптимизации ОИП при развитии системах диагностирования и прогнозирования их состояния, возможности непрерывного контроля.

6. **Главным преимуществом ПКМ** следует считать его **инвариантность к специфике ОИП и универсальность используемых процедур** количественной оценки качества ОИП и их систем.

7. Среди **негативных свойств ПКМ**, пожалуй, можно назвать лишь определенные сложности при **типизации моделей и согласовании предпочтений** лица, принимающего решения (модели индексов критериальной значимости) в условиях информационной неопределенности (дефицита) о свойствах и характеристиках ОИП.

Решение этой задачи, по нашему мнению, лежит на пути развития и широкомасштабного внедрения **систем автоматизированной поддержки принятия решений (АСППР)** [4-13] с **интерактивной поддержкой оптимизации вариантов ОИП на основе** средств информационно-аналитической и интеллектуальной поддержки обоснования принятия ЛПР решений с использованием программных комплексов (ПК) типа «АСОР», «СПРУ», «СОТМУ», «КСРП» [1, 6, 10, 13].

Важное место среди новых аспектов рассмотрения возможностей ПКМ системной оптимизации ОИП принадлежит анализу и рациональному выбору частных алгоритмов агрегирования показателей качества, на которых основан далее подробнее.

### 3. Сравнительные свойства алгоритмов агрегирования показателей качества

Одним из важных вопросов оптимизации структуры и функциональных возможностей ОИП является выбор типа алгоритма агрегирования ПК. К настоящему времени наиболее рациональным алгоритмом, как многократно показано в [10-13], является **гармонический алгоритм** (5.4) [1] вида

$$C_{g,N}^{\Gamma} = [C_{g,N}^M(w_n, q_n) \times C_{g,N}^A(w_n, q_n)]^{\frac{1}{2}} = \left[ \prod_{n=1}^N q_n^{w_n} \times \sum_{n=1}^N (w_n, q_n) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Приведенный на рис. 2 график сравнения альтернативных алгоритмов агрегирования по данным числового (цифрового) моделирования показывает, что именно гармонический (3) алгоритм ( $\Gamma$ , на графике - ГрМ) и модель (5.3) [1] обладают **минимальной методической погрешностью оценки** в сравнении с «оптимистической» (5.1) [1] аддитивной (линейной) моделью (на графике - АМ) и алгоритмом (А) с завышенной оценкой ПК и



мультипликативным (5.2) [1] «пессимистическим» алгоритмом (М) и моделью (на графике - ММ), который обеспечивает минимальную (но гарантированную) оценку качества ОИП.

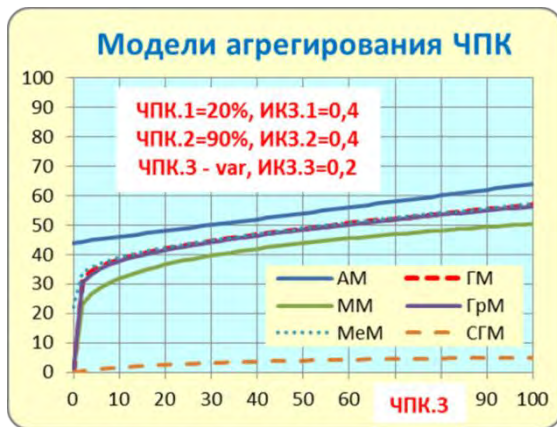


Рис. 2. Сравнение алгоритмов агрегирования

Причем, **критичность этой особенности** (свойства) тем выше, чем меньше значение ЧПК. На следующем этапе исследований с анализом многочисленных вариантов числового (цифрового) моделирования представляется целесообразным эти свойства рассмотреть и отдельно представить в сочетании со свойствами самого ПКМ системной оптимизации ОИП.

Далее рассмотрим основные положения методики, реализующей ПКМ системной оптимизации ОИП на примере «базового» ОМТ класса «Корабль».

#### 4. Методика анализа и синтеза качества объектов исследовательского проектирования класса «Корабль»

В соответствии с типовой структурой ОМТ класса «Корабль» [9], включая элементы инфраструктуры, приведенной в обобщенном виде на рис. 3, его проектное качество в соответствии с моделью (1) и в контексте изложенного выше может быть представлено моделью вида

$$Q_K = C_{K,5}^A \{w_m, C_{m,9}^r [w_g, C_{g,27}^r (w_n, q_n)]\}, \quad (4)$$

где индексы у обобщенных операторов свертки интерпретируются следующим образом.

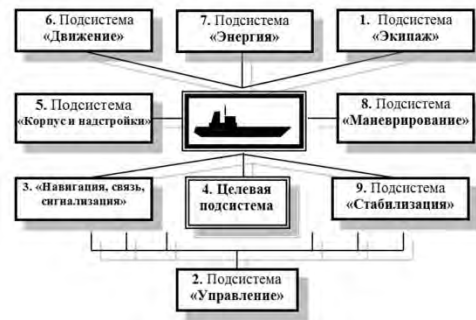


Рис. 3 – Типовая структура ОМТ класса «Корабль»

Количественная оценка векторного критерия качества ОМТ класса «Корабль» представляет собой свертку показателей качества третьего порядка, включая:

$M = 5$  модельных показателей качества (МПК, например, для выбранных из множества моделей по технологии и методу АСОР [10] по числу решаемых ОИП основных 5 задач по предназначению и уровням введенной готовности (вариант) по алгоритму свертки аддитивного типа (А);

$G = 9$  групповых показателей качества, отражающих основные свойства ОМТ класса «Корабль» в составе 9 основных подсистем (рис. 3);

$N \geq 27$  частных показателей качества (вариант), отражающих отдельные свойства ОМТ по всем 9 подсистемам и, например, минимум 3 ЧПК для каждого из ГПК по алгоритму свертки гармонического типа (Г), обеспечивающему, как показано в [12-13], минимальную методическую погрешность оценки КПК ОМТ класса «Корабль».

Основными процедурами **мониторинга** оценки, анализа, синтеза и оптимизации проектного качества ОМТ класса «Корабль» при его исследовательском проектировании, а также **мониторинга** эффективности при эксплуатации ОМТИ класса «Корабль» согласно рассматриваемой ПКМ и технологии её реализации **методически предусматривается:**

Шаг 1. **Ввод разнородных исходных данных** лицами, обосновывающими (ЛОР), принимающими (ЛПР) и, при необходимости, исполняющими принятые решения (ЛИР) в процессе ИП, а в процессе эксплуатации – ввод данных с соответствующих датчиков контроля обстановки по каналам ввода данных организационно-технического контроля с их шкалированием и нормированием по обобщенному алгоритму ПКМ системной оптимизации ОИП вида (6.1) [1].

Шаг 2. **Комплексная оценка ЧПК (шкалирование), ГПК, МПК и КПК**, а также АСПК, МСПК, ПСПК в соответствии с алгоритмами оценивания (1) и (2) по специальным алгоритмам типа (5) [1] с формализацией и непрерывной актуализацией соответствующих квалиметрических баз данных и знаний (КБДЗ).



Оценка перспективности развития ОМТ класса "Корабль: БПК"							
Назначение ОМТ:		Обеспечение боевого превосходства в составе ТГ, ОТС.					
Предназначение ОМТ класса "Корабль: БПК"		Цель: Борьба с подводными лодками (ПЛ) в Океанской зоне					
<p><b>Основные свойства ОМТ класса "Корабль: БПК" варианта "5.Ф-22350 "АФСС Горшков" по отношению к варианту "1.БПК-61" Строгий":</b></p> <p><b>Перспективность развития БПК</b></p> <p>Варианты развития БПК</p>	1. Боевой потенциал (качество достижения цели, ПС "1.Экипаж" (БГ, ЧФ, компетенции, освоение), "2.Управление", "3.Навигация, связь, сигнализация", "4.Целевая"): 1.1.Управляемость. 1.2.Вооруженность. 1.3.Тактическое преимущество.	42,4%					
	2. Боевая устойчивость (ПС "8.Маневрирование", "9.Стабилизация"): 2.1.Скрытность. 2.2.Живучесть. 2.3.Восстанавливаемость (экипажа, боевая, информационная, техническая).	87,4%					
	3. Технологичность применения (ПС "5.Корпус и надстройки", "6.Движение", "7.Энергия"): 3.1.Мореходные свойства (непотопляемость, остойчивость, плавучесть, прочность, ходкость, управляемость). 3.2.Энерговооруженность. 3.3.Безопасность службы, эксплуатации.	24,7%					
	4. Ресурсная обеспеченность: 4.1.Оперативная обеспеченность. 4.2.Экономичность владения (Стоимость за покупки, освоения, эксплуатации, расходных материалов, ремонта). 4.3.Полнота запасов.	-16,1%					
	5. Перспективность и др.: 5.1.Боевое превосходство. 5.2.Перспективность развития. 5.3.Другие.	30,4%					
<b>Боевое превосходство (конкурентная способность) по отношению к варианту 1, БП (КС), %:</b>		42,4%					
<b>Перспективность развития по отношению к варианту 2 (ПР), %:</b>		42,0%					
Критерии оценки качества \ Варианты ОМТ	ИКЗ (вес) %	Z	1.БПК-61 "Строгий" (Базовый)	2.БПК-1134-А "Кронштадт"	3.БПК-1134-Б "Керчь"	4.БПК-1155 "Адм.Ч"	5.Ф-22350 "Горшков"
Год введения в строй			5.5.66	12.12.66	5.1.76	28.1.99	2018
<b>БОЕВОЙ ПОТЕНЦИАЛ, БПКпк, ед.</b>	-	-	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,04</b>	<b>1,18</b>	<b>1,43</b>
<b>1. БОЕСПОСОБНОСТЬ, КП, ед.</b>	<b>20%</b>	<b>1</b>	<b>1,01</b>	<b>1,77</b>	<b>1,87</b>	<b>2,39</b>	<b>3,03</b>
1.1.Управляемость, %	30%	1	1,00	0,97	1,00	1,13	1,32
1.2.Вооруженность, %	50%	1	1,00	2,76	2,99	4,21	5,75
1.3.Тактическое превосходство, %	20%	1	1,06	1,05	1,06	1,06	1,06
<b>2. БОЕВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ, КП, ед.</b>	<b>20%</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1,02</b>	<b>1,20</b>	<b>1,45</b>	<b>1,87</b>
<b>3. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, КП, ед.</b>	<b>20%</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1,01</b>	<b>1,05</b>	<b>1,11</b>	<b>1,25</b>
<b>4. РЕСУРСНАЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ, КП, ед.</b>	<b>20%</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>0,80</b>	<b>0,73</b>	<b>0,72</b>	<b>0,84</b>
<b>5. ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ и др. факторы, КП, ед.</b>	<b>5%</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1,01</b>	<b>1,04</b>	<b>1,15</b>	<b>1,30</b>
<b>9. ЭКОНОМИЧНОСТЬ владения, млн. руб.</b>	<b>10%</b>	<b>1</b>	<b>0,32</b>	<b>0,10</b>	<b>0,09</b>	<b>0,09</b>	<b>0,12</b>
<b>11. Другие факторы развития, уе</b>	<b>5%</b>	<b>1</b>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
<b>Боевое превосходство (конкурентная способность), БП, %</b>			1,00	1,00	1,03	1,18	1,42
Ранжирование оценок, R			<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Перспективность развития (ПР) в сравнении с вариантом 2, %</b>			1,00	1,00	1,03	1,17	1,42
ПК "КСР-Ф"	Эксперты:		Алехин К.В.		Карпов А.Е.		21.06.20

Рис. 4 – Пример реализации Методики с использованием программного комплекса «КСР»

Шаг 3. Прогнозирование изменения данных и обстановки в соответствии с КБДЗ, например, по алгоритму адаптивного регрессионного анализа [6].

Шаг 4. Минимально-избыточная визуализация данных мониторинга обстановки с целью обеспечения информационно-комфортного ее

восприятия, использования операторами, ЛОР, ЛПР (по принципу «Важно знать не многое, а нужное»).

Шаг 5. Автоматическая процедура формирования проектов управленческих решений с использованием алгоритмов *дискреционного типа* на основе действующих организационно-распорядительных (ОРД) и нормативно-методических документов (НМД) в соответствии с полномочиями соответствующих операторов (ЛОР, ЛПР, ЛИР), например, по технологии СПРУ [3-4].

Шаг 6. Мониторинг исполнения ЛИР принятых ЛПР управленческих решений по данным квитирувания и объективного контроля обстановки с использованием данных мониторинга обстановки по всему множеству ПК от ЧПК до ПСПК.

Шаг 7. Оценка качества и эффективности управления ОМТ класса «Корабль» ЛОР и ЛПР по алгоритму, аналогичному (6.3) [1], по данным визуального анализа обстановки на шаге 6 с ситуационным принятием корректирующих решений.

Шаг 8. Оценка индексов критериальной значимости (ИКЗ) по модели (7.4) [1], отражающих степень влияния ЧПК на АПК верхнего системного уровня – КПК и ПСПК с целью обоснования направлений перспективного развития ОИП по критерию максимума ИКЗ.

Шаг 9. Многовариантный синтез альтернативных вариантов ОИП с учетом технологической, организационно-технической и системной специфики всех стадий жизненного цикла ОИП.

Шаг 10. Полиmodelьная квалиметрическая системная оптимизация выбора варианта ОИП в соответствии с алгоритмом (8.1) [1] и *учетом* модельных предпочтений, корректировки исходных данных и квалиметрической ранговой оптимизации выбора предпочтительного варианта ОИП.

Шаг 11. Регистрация принятых решений при системной оптимизации ОИП с последующей их апробацией, корректировкой и утверждением.

В порядке иллюстрации возможности и результатов реализации данной Методики на рис. 4 приведены данные сравнительного анализа 5 кораблей класса «Большой противолодочный корабль» с использованием Программного

комплекса (ПК) «КСПР-Ф» (разработка СПбГМТУ). Подробному рассмотрению технологии и ряду примеров реализации ПКМ инвариантной оценки качества и эффективности ОМТИ посвящена отдельная статья.

Приведенные основные положения **Методики полиmodelьного квалиметрического анализа, синтеза и оптимизации качества разнородных ОИП** на примере ОМТ класса «Корабль», накопленный опыт её реализации и использования подтверждают уникальные возможности, практическую значимость и перспективность развития реализуемого в ней ПКМ системной оптимизации ОИП.

## Заключение

В результате проведения ряда поисковых и прикладных исследований обоснована целесообразность и возможность инвариантного модельного представления качества современных структурно сложных организационно-технических систем, а также мониторинга, прогнозирования и управления их качеством на базе представляемого ПКМ системной оптимизации ОИП. В его развитие выполнен анализ свойств метода и алгоритмов агрегирования показателей качества, разработана представленная Методика инвариантной оценки, анализа и синтеза качества и эффективности объектов морской техники и морской инфраструктуры на примере объекта исследовательского проектирования класса «Корабль», приведен пример реализации Методики применительно к сравнению 5 вариантов больших противолодочных кораблей.

На следующем этапе исследований, результаты которых будут представлены в отдельной статье, планируется рассмотреть варианты реализации ПКМ, а также результаты цифрового (числового) моделирования качества и эффективности разнородных объектов исследовательского проектирования.

## Литература

1. Алексеев А.В. Модель инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники // Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies, № 2 том 2, 2020, с. 53-60/№ 2 part 2, 2020, pp. 53-60.
2. Соколов А.А., Тюков А.П., Щербakov М.В., Яновский Т.А. Многоуровневая архитектура системы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в ресурсобеспечивающих системах промышленных производств // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал, Том 7, 2019, № 1, с. 352 – 361.
3. Алексеев А.В. Математическая модель квалиметрического анализа, синтеза и оптимизации проектных и управленческих решений // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы IX международной научно-технической конференции в рамках IV Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». – СПб.: СПбГМТУ, 2020, с. 354 – 359.
4. Алексеев А.В., Смольников А.В., Сус Г.Н., Ушакова Н.П. Когнитивные технологии системы поддержки принятия решений и управления борьбой за живучесть корабля, судна // Системы управления и обработки информации: научно-техн. сб. /АО «Концерн «НПО «Аврора». СПб, 2019. Вып. 3(46), с. 18-27.
5. Смольников А.В., Алексеев А.В., Антипов В.В., Бобрович В.Ю. Ранговая сертификация современных эрготехнических систем, как реальный способ повышения конкурентоспособности объектов морской техники и морской инфраструктуры – Морской Вестник, 2013, № 1 (10), с. 55 - 59.
6. Алексеев А.В. Методология синтеза системотехнических решений автоматизации процессов борьбы за живучесть судов повышенного риска // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы третьей Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014, с. 181.



7. Алексеев А.В., Антипов В.В., Бобрович В.Ю., Смольников А.В. Концепция и технология ранговой партнерской сертификации объектов морской техники и инфраструктуры //Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Спб., 7-9.10.2014 – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 29-34.
8. Алексеев А.В. Оптимизация проектных и управленческих решений при комплексном обеспечении безопасности большого города //Безопасность большого города / Сб. ст. под ред. Э.И. Слепяна. – Санкт-Петербург: Издательство Сергея Ходова, 2007, с. 400-418.
9. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем – СПб.: Моринтех, 2001.– 429с
10. Алексеев А.В. Технология и программный комплекс квалиметрической ранговой оценки качества сложных информационно-аналитических систем //Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении–2008». – СПб., ОАО «Северные верфи», 19.06.2008, с.110-118.
11. Алексеев А.В., Орлов К.М. Полимодельная оценка качества и оптимизация сложных эрготехнических систем //Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2011) /V всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности: Труды конференции. Том 1 - Санкт-Петербург, 2011. С.89-95.
12. Алексеев А.В., Тюрин И.С., Удодова Е.Н. Алгоритмы геометрического и гармонического агрегирования векторных критериев оптимизации объектов морской техники и морской инфраструктуры //XIV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2014)». Санкт-Петербург, 29-31 октября 2014 г.: Материалы конференции. \ СПОИСУ. – СПб, 2014, с. 442 – 443.
13. Алексеев А.В. Технология квалиметрической ранговой оптимизации проектных и управленческих решений //Труды Международной Научной Школы «Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах (МА БР-2007)» – Спб., ГОУ ВПО «СПбГУАП» 2007. – с. 285 – 290.

#### References

1. Alekseyev A.V. Model of invariant estimation of quality and efficiency of marine engineering objects //Marine intellectual technologies /Marine intellectual technologies, no. 2 volume 2, 2020, pp. 53-60/ no. 2 part 2, 2020, pp. 53-60.
2. Sokolov A. A., Tyukov A. P., Shcherbakov M. V., Yanovsky T. A. Multilevel architecture of the system of intellectual support for managerial decision-making in resource-providing systems of industrial production //Modeling, optimization, and information technology. Scientific journal, Volume 7, 2019, no. 1, pp. 352-361.
3. Alekseev A.V. Mathematical model of qualimetric analysis, synthesis and optimization of design and management solutions //Actual problems of marine energy: materials of the IX international scientific and technical conference within the IV all-Russian scientific and technical forum "Ship power engineering: from the past to the future". - Saint Petersburg: Spbgmtu, 2020, p. 354-359.
4. Alekseev A.V., Smolnikov A.V., SUS G. N., Ushakova N. P. Cognitive technologies of decision support systems and management of the fight for the ship's survivability //Information management and processing systems: scientific and technical SB /Concern JSC NPO Aurora. Saint Petersburg, 2019. Issue 3 (46), pp. 18-27.
5. Smolnikov A.V., Alekseev A.V., Antipov V. V., bobrovich V. Yu. Rank certification of modern ergotechnical systems as a real way to improve the competitiveness of marine equipment and marine infrastructure-Marine Bulletin, 2013, no. 1 (10), pp. 55 - 59.
6. Alekseyev A.V. Methodology of synthesis of system-technical solutions for automation of processes of struggle for survivability of vessels of increased risk //Actual problems of marine energy: materials of the third all-Russian intersectoral scientific and technical conference. Saint Petersburg: Spbgmtu Publishing house, 2014, p. 181.
7. Alekseev A.V., Antipov V. V., bobrovich V. Yu., Smolnikov A.V. Concept and technology of rank partner certification of marine equipment and infrastructure objects //Materials of the conference "Information technologies in management" (ITU-2014). SSC RF JSC "Concern "CRI "Electropribor". SPb., 7-9.10.2014 – SPb.: JSC "Concern "CRI "Electropribor", 2014. S. 29-34.
8. Alekseyev A.V. Optimization of design and management solutions for integrated security of a large city //Safety big city /Sat. article under the editorship of E. I. Slepian. – Saint-Petersburg: Sergey Khodov publishing house, 2007, pp. 400-418.
9. Gaikovich A. I. Fundamentals of the theory of designing complex technical systems-Saint Petersburg: Morintech, 2001. – 429 s.
10. Alekseyev A.V. Technology and software package of qualimetric rank assessment of the quality of complex information and analytical systems //Materials of the IX all-Russian scientific and practical conference MORINTECH-PRAKTIK "Information technologies in shipbuilding-2008".-St. Petersburg, JSC"Northern shipyards", 19.06.2008, p.110-118.
11. Alekseev A. V., Orlov K. M. Polymodally quality assessment and optimization of complex systems ergo technical //Simulation modeling. Theory and practice (IMMOD-2011) /V all-Russian scientific and practical conference on simulation modeling and its application in science and industry: Proceedings of the conference. Volume 1-Saint Petersburg, 2011. Pp. 89-95.

12. Alekseev A.V., Tyurin I. S., Udodova E. N. Algorithms for geometric and harmonic aggregation of vector criteria for optimization of marine engineering and marine infrastructure objects //XIV St. Petersburg international conference " Regional Informatics (RI-2014)". Saint Petersburg, October 29-31, 2014: conference Proceedings. \SPOIS. – Saint-Petersburg, 2014, pp. 442 – 443.
13. Alekseev A.V. Technology of qualimetric rank optimization of design and management decisions //«Proceedings of the International Scientific School» Modeling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems (MA BR-2007)" – St. Petersburg, state University of higher education "Spbguaр" 2007. – p. 285 – 290.

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

**Анатолий Владимирович Алексеев**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: iapbgks@bk.ru

**Anatoly V. Alekseev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of automation and measurement, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: iapbgks@bkl.ru

Поступила в редакцию: 26.06.2020

Принята к публикации: 12.02.2021



УДК 629.5.01

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.027

## Оптимизация корабля, использующая предпочтения проектанта

А.И. Гайкович<sup>1</sup> e-mail: a\_gaikov@mail.ru<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В статье рассматривается подход к решению задачи оптимизации характеристик корабля на ранних стадиях проектирования. Задача оптимизационного проектирования формулируется как многокритериальная. Дается краткий обзор подходов к решению задач математического программирования такого класса. Рассматривается такой метод многокритериальной оптимизации, широко используемый в экономических задачах, как оптимизация по Парето. Для решения задач, связанных с созданием технических систем, характерно большое количество частных критериев эффективности, выраженных, как правило, нелинейными функциями, а иногда описанными алгоритмическими процедурами. Следовательно, поверхность эффективных точек Парето, на которой ищется наилучший вариант проекта, представляет собой сложный геометрический объект в  $n$ - мерном пространстве частных критериев. Выбор наилучшего решения предлагается путем использования предпочтения проектанта, сформулированными в виде функции ценности. Функция ценности также является сложной поверхностью в  $n$ -мерном критериальном пространстве. Аналитическое решение, дающее координаты точек касания этих поверхностей, представляет сложную математическую проблему. В статье предлагается численный метод решения задачи оптимизации по Парето для сложной технической системы, каковой является корабль.

**Ключевые слова:** корабль, оптимизация, Парето, функция ценности.

### Ship optimization using the preferences of the designer

Aleksandr I. Gaikovich<sup>1</sup> e-mail: a\_gaikov@mail.ru<sup>1</sup>Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article considers an approach to solving the problem of optimizing the ship's characteristics at the early stages of design. The optimization design problem is formulated as a multi-criteria one. A brief overview of approaches to solving mathematical programming problems of this class is given. We consider such a method of multi-criteria optimization, widely used in economic problems, as Pareto optimization. To solve problems related to the creation of technical systems, a large number of specific performance criteria are characteristic, expressed, as a rule, by nonlinear functions, and sometimes described by algorithmic procedures. Consequently, the surface of effective Pareto points, on which the best variant of the project is sought, is a complex geometric object in the  $n$ -dimensional space of partial criteria. The choice of the best solution is proposed by using the preferences of the designer, formulated in the form of a value function. The value function is also a complex surface in the  $n$ -dimensional criterion space. The analytical solution that gives the coordinates of the points of contact of these surfaces is a complex mathematical problem. The paper proposes a numerical method for solving the Pareto optimization problem for a complex technical system, such as a ship.

**Keywords:** ship, optimization, Pareto, value function

#### Введение

Создание любой сложной технической системы, в том числе и корабля, есть результат компромисса между противоречивыми требованиями к ней. Способом формализации подобного компромисса является принцип оптимизации, сводимый к задаче математического программирования:

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}(c_1, \dots, c_q); \quad \mathbf{X} = \mathbf{X}(x_1, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$\mathbf{X}_{\min} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_{\max} \quad (2)$$

$$G_j(\mathbf{X}, \mathbf{C}) \geq A_j(\mathbf{C}), \quad j = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$\mathbf{Z}(\mathbf{X}, \mathbf{C}) \rightarrow \text{extr} \quad (4)$$

где  $\mathbf{C}$  – множество факторов внешней среды образующее вектор технического задания (ТЗ) на проектирование системы;  $\mathbf{X}$  – вектор оптимизируемых параметров проекта системы (переменных) содержит компоненты.

Компоненты вектора  $\mathbf{X}$  имеют ограничения на диапазон возможных значений. Ограничения данного типа являются *параметрическими* и, в общем виде записываются как (2).

Требования к качествам проектируемой системы представляют собой отношения баланса и дисбаланса, т.е. выражаются математически в виде равенств и неравенств. В математической *нотации*

*система функциональных ограничений* показана в виде (3).

Функции  $G_j$  представляют собой оценки  $j$ -ых качеств системы, а функции  $A_j$  – требования к этим качествам. Очевидно, что эти функции зависят от вектора ТЗ.

Естественно, что векторов  $\mathbf{X}$ , удовлетворяющих условиям (2) и (3) при корректном техническом задании может быть несколько. Это означает, что существует несколько вариантов проектов системы, соответствующим предъявленным требованиям. Для выбора наилучшего варианта вводят в рассмотрение специальную функцию – *критерий эффективности* или *функцию цели* (4). Ее величина монотонно связана с качеством проекта.

Задача создания «идеального» корабля полностью соответствует задаче (1) ... (4).

#### Методы решения многокритериальных задач оптимизации

В зависимости от вида критерия эффективности задачи математического программирования делятся на однокритериальные и многокритериальные. Однокритериальные задачи используют в качестве оценки эффективности какое-либо одно свойство системы, многокритериальные – совокупность её свойств.

Например, оценкой эффективности надводного корабля может являться вероятность решения совокупности задач, решение каждой из которых оценивается своей вероятностью:

$$Z_1 = P_{уро} ; Z_2 = P_{пво} ; Z_3 = P_{гло} \quad (5)$$

Где  $P_{уро}$  – вероятность выполнения ударной задачи,  $P_{пво}$  – вероятность выполнения задачи противовоздушной обороны,  $P_{гло}$  – вероятность выполнения задачи противолодочной обороны.

К методам решения задачи (1) ... (4) относятся следующие [1], [2], [3], [4], [5], [6].

**1. Замена многих критериев единым критерием** (свертка критериев) при сепарабельных по оптимизируемому переменным локальных критериев [1].

Общий вид аддитивной свертки:

$$Z(X) = \sum_{i=1}^N a_i Z_i(X_i), \quad (6)$$

где  $N$  – число критериев при принятии решения,  $Z_i(X_i)$  –  $i$ -й критерий,  $X_i$  – вектор параметров решения

причем  $\bigcap_{i=1}^N X_i = \emptyset$ ,  $a_i$  – весовой коэффициент,

указывающий приоритет  $i$ -й подсистемы в оценке всей системы. Если все  $a_i = 1$ , то говорят о линейной свертке

Пример мультипликативной свертки:

$$Z(X) = \prod_{i=1}^N [a_i Z_i(X)]^{\beta_i}, \quad (7)$$

где  $a_i, \beta_i$  – коэффициенты выбираемые лицом, принимающим решение (ЛПР), т.е. назначаемые субъективно.

### 2. Лексикографическое упорядочение [2].

Полагается, что локальные критерии  $Z_1, \dots, Z_n$  упорядочены по важности. Вариант решения  $X'$  предпочитается варианту  $X''$ , если оно имеет большее значение по  $Z_1$  (если все частные критерии максимизируются), невзирая на то, насколько оно является хорошим или же плохим по другим критериям. Только если значения  $Z_1$  для них совпадают, вводится в рассмотрение критерий  $Z_2$ . Лишь, если имеет место совпадение и по  $Z_1$  и по  $Z_2$ , вводится в рассмотрение критерий  $Z_3$ , и т. д.

Если  $Z'$  и  $Z''$  – различные точки в пространстве критериев, то они не могут быть одинаковыми по предпочтительности при лексикографическом упорядочении.

### 3. Метод последовательных уступок [2].

Среди всех вариантов решения, удовлетворяющих всем ограничениям, выбираем вариант с максимальным значением частного критерия  $Z_1$  (предполагая частные критерии максимизируемые), обозначая это значение  $Z_1^*$ .

Выбираем «уступку» по этому критерию  $h_1$  и назначаем критериальное ограничение:

$$G_1^* \geq Z_1^* - h_1 \quad (8)$$

На втором шаге отыскиваем вариант, удовлетворяющих всем требованиям к системе и дополнительному ограничению (8) с максимальным значением второго критерия  $Z_2^*$  и также, выбирая

«уступку»  $h_2$ , назначаем второе критериальное ограничение:

$$G_2^* \geq Z_2^* - h_2 \quad (9)$$

Затем эта процедура повторяется до исчерпания всех критериев. Точка, в которой реализуется выбор  $Z_k \rightarrow \max$  считается наилучшей. Однако, она зависит и от порядка нумерации критериев и от величины уступок, которые носят субъективный характер.

### 3. Выбор по критерию Парето [3].

Центральным понятием этого метода является поверхность Парето. Пространство состояний проектируемой системы (множество векторов  $X$ ) отображается в пространство критериев эффективности (множество векторов  $Z$ ). Оптимальность по Парето – такое состояние системы, при котором значение каждого частного критерия эффективности, характеризующего систему, не может быть улучшено без ухудшения других.

#### Численное построение поверхности Парето

Множество точек Парето образует в многомерном пространстве критериев поверхность, которую называют поверхностью Парето (рис. 1).



Рис. 1. Поверхность Парето для 2-х максимизируемых критериев

Поэтому основное требование к любому решению – оно должно принадлежать поверхности Парето. Решения, лежащие на поверхности Парето, называются «безусловно лучшими».

Существуют различные алгоритмы получения поверхности Парето при многокритериальной оптимизации. Наиболее простым в реализации является метод зондирования единичного  $n$ -мерного куба.

Система параметрических ограничений оптимизационной задачи (2) приводится к системе ограничений в  $n$ -мерном единичном кубе путем преобразования переменных:

$$Y = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (10)$$

Обратным преобразованием получим отображение точек  $n$ -мерного куба в пространство критериев системы.

Значения сканирующих точек получают с помощью квазислучайных последовательностей с низким расхождением. Это метод построения (бесконечных) последовательных точек детерминированным

образом, который уменьшает вероятность скапливания (расхождения), в то же время, обеспечивая равномерное покрытие всего пространства.

Примером такого метода является рекурсивное получение координаты точки единичного n-мерного куба [7]:

$$y_n = \{n \cdot \alpha\}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

$$\alpha = (1/\varphi_d, 1/\varphi_d^2, 1/\varphi_d^3, \dots, 1/\varphi_d^d) \quad (12)$$

где {...} – дробная часть числа,  $\varphi_d$  – положительный корень уравнения  $z^{d+1} = z + 1$ ,  $d$  – размерность единичного куба.

На первом этапе, выполняется сканирование единичного куба с использованием квазислучайной последовательности. Обращением формулы (10), получают  $M$  состояний проектируемой системы. Затем проверяется выполнение функциональных ограничений (3) и отбрасываются те варианты (точки в пространстве состояний) системы, для которых эти требования не выполняются.

Для всех оставшихся точек множества  $X$  из параллелепипеда (2) рассчитываются все частные критерии  $Z_1, \dots, Z_n$ .

Для каждого из критериев составляется своя таблица испытаний, в которой все значения этого критерия расположены в порядке убывания и указаны номера соответствующих точек (предполагается максимизация частных критериев).

$$Z_i(X_{j1}) \geq Z_i(X_{j2}) \geq \dots \geq Z_i(X_{jM}), \quad i = 1, \dots, N \quad (13)$$

На втором этапе назначаются критериальные ограничения. Осуществляется просмотр таблицы с учетом реальных возможностей критерия  $Z_1$ , назначаем критериальное ограничение  $Z_1^*$  (8) и так для всех критериев. После назначения всех  $Z_i^*$  этап заканчивается.

Необходимо учитывать возможности критерия, т.е. принять во внимание диапазон изменения значения критерия и частоту максимальных или иных значений в таблице испытаний.

Назначение каждого ограничения происходит независимо от остальных.

На третьем этапе проверяется совместимость критериальных ограничений. Определяется множество точек  $X_j$  в таблице испытаний, для которых выполнены все критериальные ограничения. Если это множество пусто, то необходимо вернуться к этапу критериальных ограничений и ослабить принятые ограничения. Возможно, также, увеличение числа пробных точек.

После окончательного назначения критериальных ограничений получается множество допустимых точек.

На четвертом этапе определяются точки, приближенные к поверхности Парето. Среди множества критериев выделяются те из них, которые представляются наиболее важными.

Выбирается и помечается какая-либо из допустимых точек  $X_{i'}$ . Просматриваются все остальные точки, исключаются те из них, для которых при всех  $j = 1, \dots, M$   $Z_i(X_{i'}) \geq Z_i(X_j)$  и хотя бы при одном  $i = i_0$  имеет место строгое неравенство  $Z_i(X_{i'}) > Z_i(X_j)$ .

Затем среди оставшихся точек выбирается какая-нибудь непомеченная, она помечается и повторяется процесс исключения безусловно худших точек. После конечного числа шагов останутся только помеченные точки.

В N-мерном пространстве критериев приближенно помеченным эффективным точкам соответствуют приближенно точки множества Парето, т.е. предлагаемый алгоритм позволяет приближенно находить множество Парето при нескольких критериях качества.

### Формализация предпочтений проектанта

Лицо, принимающее решение (ЛПР), должно выбрать один из вариантов, принадлежащих множеству Парето.

Ставится задача о построении функции ценности  $U(Z_1 \dots Z_k)$ , отражающей систему предпочтений ЛПР:

$$U(Z'_1, \dots, Z'_N) \succ U(Z_1, \dots, Z_N) \quad (14)$$

В этом случае, точка  $A'$  в пространстве состояний системы со значениями всех частных критериев  $Z'_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), по мнению конструктора, предпочтительнее точки  $A$  со значениями всех частных критериев  $Z_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ). Если такая функция найдена, то задача о выборе наилучшей точки сводится к отысканию общей точки этой функции с поверхностью Парето.

Проблема построения функции ценности рассматривается в известных источниках, например [8].

Функция ценности определяет не наилучшее значение свертки критериев, а наилучшее, с точки зрения ЛПР, соотношение между частными критериями, которые могут иметь различную физическую природу.

Для выявления предпочтения используются поверхности безразличия. Точки из пространства критериев, лежащих на поверхности безразличия, являются для ЛПР эквивалентными по значимости. Идея выбора оптимального варианта системы из точек множество Парето показано на рис. 2 для 2-х критериев ( $R$  – область допустимых решений).

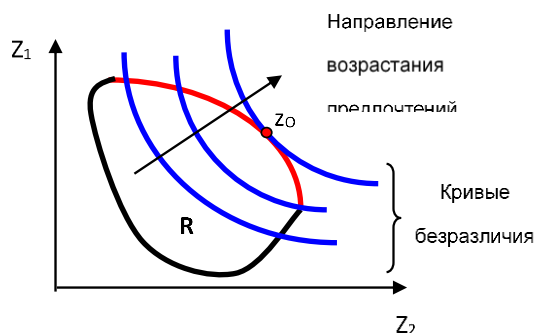


Рис. 2. Вариант с критерием  $Z_0$  является наилучшим

В этом случае, проблема построения кривой безразличия формулируется в виде: «Если критерий  $Z_2$  увеличен на  $\Delta$ , то насколько нужно уменьшить критерий  $Z_1$ , чтобы компенсировать данное увеличение  $Z_2$ ?».

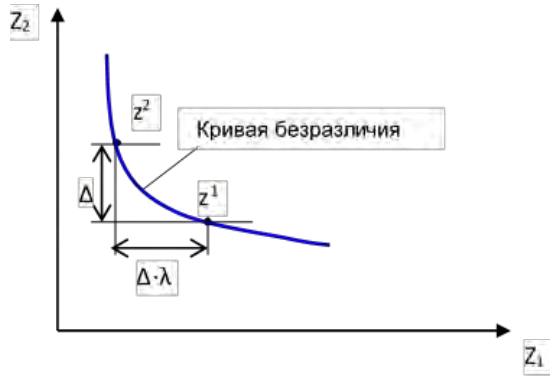


Рис. 3. Определение предельного коэффициента замещения

Вводится понятие «предельный коэффициент замещения»  $\lambda$ , т.е.  $\Delta Z_2 = Z_2^p - Z_2^q$  соответствует  $Z_1^q - Z_1^p = \lambda \cdot \Delta Z_2$  (рис 3).

Построение поверхностей безразличия возможно путем анкетирования ЛПР.

Рассмотрим в качестве примера задачу определения скорости и грузоподъемности перспективного сухогрузного судна. Желательно получить судно с максимальной скоростью (частный критерий  $Z_1$ ) и грузоподъемностью (частный критерий  $Z_2$ ).

Процесс построения кривых безразличия для рассматриваемого примера содержит несколько шагов.

1. За минимально приемлемые параметры перспективного судна ЛПР принимает  $Z_1^0 = 16$  узлов и  $Z_2^0 = 3000$  т.
2. За увеличение скорости на 1 узел ЛПР готов получить эквивалентное судно со скоростью 16 узлов, но с грузоподъемностью 5000 т. Это означает, что 1 единицу шкалы 1-го критерия, что соответствует единицу шкалы 2-го критерия на 2000 т, т.е. коэффициент замещения равен  $1/2000$ .
3. ЛПР считает, что судно со скоростью 16 узлов и грузоподъемности 7000 т и судно со скоростью 18 узлов и грузоподъемности 3000 т будут

эквивалентны судну со скоростью 17 узлов и 5000 т.

4. Если ЛПР считает, что эквивалентными являются судами со скоростью 18 узлов и грузоподъемностью 5000 т и скоростью 17 узлов с грузоподъемностью 7000 т, то получаем по-прежнему единицу шкалы по второму критерию равную 2000 т.
5. ЛПР считает, что эквивалентному судну со скоростью 18 узлов и грузоподъемностью 7000 т, будут эквивалентны судно со скоростью 16 узлов, но с грузоподъемностью 8000 т и судно со скоростью 19 узлов, но грузоподъемностью 3000 т. Здесь коэффициент замещения равен  $1/1000$ . ЛПР считает, что имеются ограничения по строительному месту и мощности линейки двигателей.
6. Линии безразличия позволяют получить совместные шкалы для замещения одного критерия другим. Будем считать, что функция ценности будет аддитивной и сепарабельной:

$$U(P_{гр}, v_s) = f(Z_1(v_s)) + \varphi(Z_2(P_{гр})) \quad (15)$$

Составим таблицу функций  $f$  и  $\varphi$ .

$v_s$ , узлы	$f$	$P_{гр}$ , т	$\varphi$
$v_s^{(0)} = 16$	0	$P_{гр}^{(0)} = 3000$	0
$v_s^{(1)} = 17$	1	$P_{гр}^{(1)} = 5000$	1
$v_s^{(2)} = 18$	2	$P_{гр}^{(2)} = 7000$	2
$v_s^{(3)} = 19$	3	$P_{гр}^{(3)} = 8000$	3

7. С помощью метода наименьших квадратов находим исходные функции:

$$f = (v_s - 16); \quad \varphi = 0,368 [(P_{гр} - 3000) \cdot 10^{-3}]^{1,28} \quad (16)$$

8. Вид функции ценности с учетом предпочтений ЛПР:

$$U = (v_s - 16) + 0,368 [(P_{гр} - 3000) \cdot 10^{-3}]^{1,28} \quad (17)$$

Процесс построения функции ценности для рассмотренного примера показана на рис. 4.

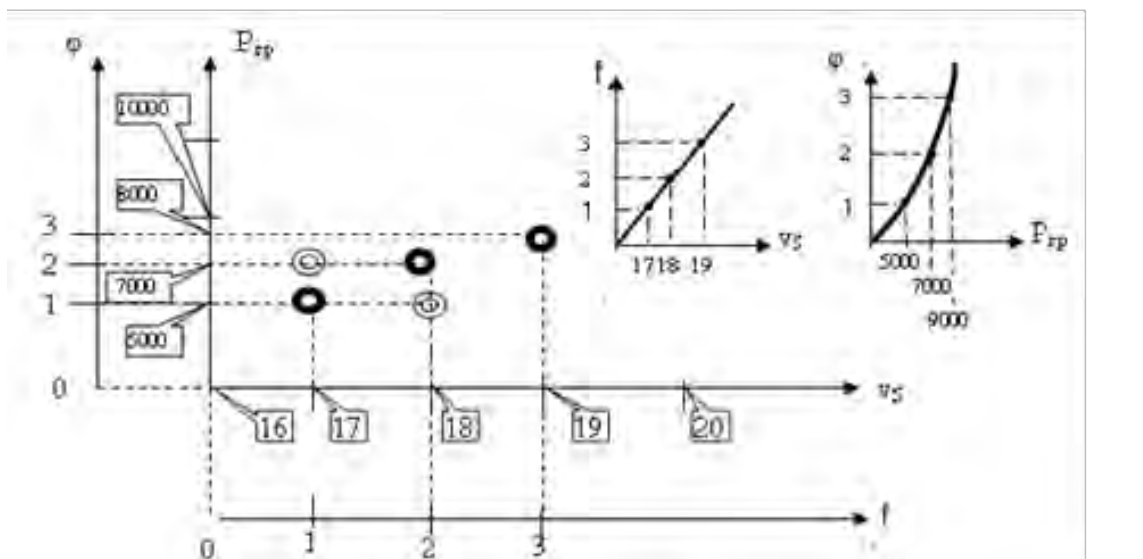


Рис. 4. Пример определения функции предпочтения для обоснования ТЗ судна



При построении функции ценности (17) было сделано неявное предположение, что предельный коэффициент замещения  $\lambda$  не зависит от значения критерия  $Z_1$ . В общем случае, коэффициент  $\lambda$  может зависеть от значений обоих критериев.

Метод анкетирования ЛПР для построения функции ценности при многих частных критериев, влияющих друг на друга, может быть неприемлем из-за трудоёмкости.

При проектировании сложных технических систем, в том числе и кораблей, функция ценности может быть построена на основании предыдущего опыта.

Проиллюстрируем такой подход на примере.

Предполагается построить накануне Великой Отечественной войны артиллерийский крейсер водоизмещением 10000 т.

Сумма целевой нагрузки боевого корабля состоит из массы вооружения ( $G_1$ ) и массы защиты ( $G_2$ ). Будем считать, что увеличение боевой эффективности и боевой устойчивости пропорционально массе целевой нагрузки, предел которой ограничен заданным водоизмещением.

Соотношение между вооружением и защитой определяется предпочтением Главного конструктора, который может опираться на существующий опыт.

В табл. 1. показано это соотношение для некоторых крейсеров в период 1903 – 1940 г.г.

Таблица 1.

Соотношение вооружения и защиты для некоторых крейсеров

Тип	«Баян»	«Олег»	«Магдебург»	«Зара»	«Белфаст»	«Аретьюза»	«Линдер»	«Пенсакола»	«Максим Горький»
Страна	Россия	Россия	Германия	Италия	Англия	Англия	Англия	США	СССР
Год	1903	1904	1909	1931	1938	1935	1933	1926	1940
$G_1$ , т	601	686	512	1372	1330	536	695	524	1246
$G_2$ , т	1449	863	607	2688	1610	633	845	945	1536
$\lambda = G_2 / G_1$	2,41	1,26	1,19	1,96	1,21	1,19	1,22	1,80	1,23

Статистическое исследование показало постоянство коэффициента предельного замещения  $\lambda$  (коэффициент корреляции  $\lambda$  с  $G_1$  равен 0,03). Функция  $\lambda(G_2) = (1,5 \pm 0,37) G_1$ .

Функция предпочтения (при математическом ожидании) будет равна:

$$U = G_1 + \lambda \cdot G_2 = 2,5 G_1 \quad (18)$$

Целевая нагрузка (с учетом среднего значения коэффициента Нормана равном 6,0 для данного класса кораблей) будет равна 1670 т.

График поверхности Парето для рассматриваемого случая, будет описываться уравнением:

$$G_2 = - G_1 + 1670 \quad (19)$$

Тогда оптимальные (по мнению проектанта) значения масс вооружения и защиты может быть получено из графика (рис. 5). Красным показано множество Парето. Результат:  $G_1=1370$  т,  $G_2 = 1530$  т.

При эмпирическом подходе к построению функции ценности, сложность её структуры определяется только возможностью определения коэффициентов, как при частных критериях эффективности, так и при их комбинациях. Например, функции ценности могут иметь вид сверток (6) и (7) или обобщенную форму:

$$U = F(\mathbf{B}, \mathbf{Z}) \quad (20)$$

где  $\mathbf{Z}(Z_1, \dots, Z_N)$  – вектор частных критериев;  $\mathbf{B}$  – матрица эмпирических коэффициентов при функциях, описывающих частные критерии и их комбинациях.

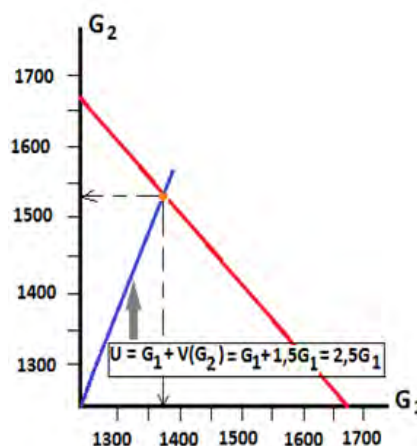


Рис. 5. Выбор оптимального варианта из множества Парето, используя функцию ценности

Идентификация функции ценности сводится к назначению формы связи  $F$  частных критериев и расчету элементов матрицы  $\mathbf{B}$ .

Эта задача может решаться методами МНК (метод наименьших квадратов) [9] и МГУА (метод группового учета аргументов) [10].

В общем случае, функция ценности представляет собой поверхность  $\mathbf{U}$  в том же  $N$ -мерном пространстве критериев, что и поверхность Парето ( $\mathbf{P}$ ).

Аналитическое определение точек касания поверхностей  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{P}$ , соответствующих наилучшему варианту решения, представляет собой сложную математическую проблему, особенно, если эти поверхности не являются выпуклыми.

Для решения этой задачи предлагается использовать численные методы.

Выше был рассмотрен алгоритм построения точечное множество Парето путем сканирования единичного куба.

Множество результатов сканирования N-мерного единичного куба  $Y$  пересчитываются по обращенной формуле (10) и определяются множество точек пространства критериев, принадлежащие поверхности функции ценности  $U$ :

$$U = F[B, Z(X)] = F[B, Z((Y \cdot (X_{\max} - X_{\min}) + X_{\min}))] \quad (20)$$

Обозначим:  $P_i$  ( $p^1, \dots, p^N$ ) точку, полученную сканированием N-мерного единичного куба и приближенно относящуюся к поверхности Парето, а  $U_j$  ( $u^1, \dots, u^N$ ) – точку, полученную сканированием и приближенно относящуюся к поверхности функции ценности. Для определения расстояния между указанными точками введем метрику в пространстве критериев вида:

$$d_{ij} = [(p^1_i - u^1_j)^2 + \dots + (p^N_i - u^N_j)^2]^{1/2} \quad (21)$$

Приближенно оптимальным вариантом решения будет точка  $P_{opt}$  поверхности Парето, для которой расстояние  $d_{opt}$  до любой точки поверхности функции ценности  $U$  будет минимальным.

Поскольку результат поиска оптимального решения является приближенным, возможно

получение множество точек поверхности Парето, отличающихся друг от друга по расстоянию  $d_{ij}$  на величину  $\epsilon$ , которое не дает возможности ЛПР различать варианты решения. В этом случае, либо ЛПР должен уменьшить величину  $\epsilon$ , либо изменить эмпирические коэффициенты функции предпочтения.

### Выводы

Принцип оптимизации при проектировании таких сложных технических систем как современный корабль является определяющим. Корабль представляет собой многофункциональную систему, поэтому использование многокритериальной оптимизацией есть логический результат системного анализа. Основной методологической проблемой многокритериальной оптимизацией является субъективность выбора наилучшего решения. Принцип Парето, признанный в экономических областях, причем применение функций ценности, описывающие опыт развития технических систем позволяют формализовать субъективные предпочтения проектантов и конструкторов. В свою очередь, подобная формализация позволяет усилить обоснование принимаемого решения.

### Литература

1. Захаров И.Г. Обоснование выбора. Теория практики. – СПб., изд. «Судостроение», 2006, 528 с.
2. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. – М., изд. «Советское радио», 1975, 192 с.
3. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М., изд. «Наука», 1982, 256 с.
4. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений: учебное пособие. – М., Физматлит, 2007.
5. Лотов А.В., Пospelова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: учебное пособие. – М., МАКС Пресс, 2008, 197 с.
6. Брестер К., Семенкин К., Адаптивный генетический алгоритм многокритериальной оптимизации. – LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 72 с.
7. Martin Roberts. Неожиданная эффективность квазислучайных последовательностей (перевод). – <https://habr.com/ru/post/440892/>
8. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М., изд. «Радио и связь» 1981, 560 с.
9. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М., изд. «Высшая школа», 1982.
10. Ивахненко А.Г. Долгосрочное планирование и управление сложными системами. – Киев, изд. «Техника», 1975.

### References

1. Zaharov I.G. Obosnovanie vybora. Teoriya praktiki. – SPb., izd. «Sudostroenie», 2006, 528 s.
2. Podinovskij V.V., Gavrilov V.M. Optimizaciya po posledovatel'no primenyaemym kriteriyam. – M., izd. «Sovet-skoe radio», 1975, 192 s.
3. Podinovskij V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nyh zadach. – M., izd. «Nauka», 1982, 256 s.
4. Podinovskij V.V. Vvedenie v teoriyu vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nyh zadachah prinyatiya reshenij: uchebnoe posobie. – M., Fizmatlit, 2007.
5. Lotov A.V., Pospelova I.I. Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenij: uchebnoe posobie. – M., MAKS Press, 2008, 197 s.
6. Brester K., Semenkin K., Adaptivnyj geneticheskij algoritm mnogokriterial'noj optimizacii. – LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 72 s.
7. Martin Roberts. Neozhidannaya effektivnost' kvazisluchajnyh posledovatel'nostej (perevod). – <https://habr.com/ru/post/440892/>

8. Kini R.L., Rajfa H. Prinyatie reshenij pri mnogih kriteriyah: predpochteniya i zameshcheniya. – M., izd. «Radio i svyaz'» 1981, 560 s.
9. L'vovskij E.N. Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul. – M., izd. «Vysshaya shkola», 1982.
10. Ivahnenko A.G. Dolgosrochnoe planirovanie i upravlenie slozhnymi sistemami. – Kiev, izd. «Tekhnika», 1975.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ (INFORMATION ABOUT AUTHOR)**

**Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская 3, Российская Федерация, e-mail: a\_gaikov@mail.ru

**Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Ship Design, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya 3, Russian Federation, e-mail: a\_gaikov@mail.ru

Поступила в редакцию: 16.12.2020

Принята к публикации: 12.02.2021

## ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 620.197.3

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.028

### Атмосферостойкие системы покрытия для судостроительной верфи

Е.И. Пласкеева<sup>1</sup> e-mail: ekaterina.plaskeeva@list.ru, Д.А. Полянская<sup>1</sup> e-mail: polyanskaya.d@icloud.com,  
В.И. Трусов<sup>1</sup> e-mail: vtroi2008@mail.ru, Р.С. Ходжаев<sup>1</sup> e-mail: xodzhaev.rustam@yandex.ru,  
Г.В. Черкаев<sup>1</sup> e-mail: gcherkaev@mail.ru

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

**Аннотация** Предметом исследования является фосфатирующий состав «HOTEX». Это цинкфосфатный водный материал с неорганическими ингибиторами коррозии анодного типа, которые эффективно подавляют развитие подпленочной коррозии под слоем грунта. Механизм действия и исследования эффективности подавления коррозии фосфатирующего состава «HOTEX» проводилась с отечественными лакокрасочными материалами типа грунта ЭФ-065 и эмали ЭП-1236. Цель работы – обоснование системы покрытия с химической подготовкой поверхности под окраску. Предложена универсальная атмосферостойкая система лакокрасочного покрытия повышенной надежности и долговечности для защиты береговых металлических сооружений, конструкций и оборудования судостроительной верфи. Впервые методами кондуктометрии, pH-метрии и измерения адгезии показана совместимость «HOTEX» с алкидным грунтом Pilot QD Primer компании JOTUN и соответствие требованиям стандартов ISO по содержанию остаточных водорастворимых веществ перед окраской. При этом дополнительная обработка поверхности «HOTEX» после абразивоструйной очистки до степени Sa2,5 не ухудшает адгезию покрытия, а также допустима нестандартная операция преобразования продуктов вторичной (вспышечной) коррозии после очистки абразивом без их удаления.

**Ключевые слова:** береговые объекты судостроительной верфи, ингибированный фосфатирующий состав «HOTEX», система лакокрасочного покрытия.

### Atmospheric resistance coating systems for shipboard yard

Ekaterina I. Plaskeeva<sup>1</sup> e-mail: ekaterina.plaskeeva@list.ru,  
Daria A. Polyanskaya<sup>1</sup> e-mail: polyanskaya.d@icloud.com, Valery I. Trusov<sup>1</sup> e-mail: vtroi2008@mail.ru,  
Rustam S. Khodjaev<sup>1</sup> e-mail: xodzhaev.rustam@yandex.ru, Georgy V. Cherkaev<sup>1</sup> e-mail: gcherkaev@mail.ru  
<sup>1</sup> St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract** The subject of the study is the phosphating composition «HOTEX». It is a zinc phosphate aqueous material with inorganic anode-type corrosion inhibitors that effectively suppress the development of sub-film corrosion under a layer of soil. The mechanism of action and research on the effectiveness of corrosion suppression of the phosphating compound «HOTEX» was carried out with domestic paints and varnishes such as soil ЭФ-065 and enamel ЭП-1236. The purpose of the work is to substantiate a coating system with chemical surface preparation for painting. A universal weather-resistant paint and varnish coating system of increased reliability and durability for the protection of coastal metal structures, structures and equipment of a shipyard is proposed. For the first time, conductometry, pH and adhesion measurements have demonstrated the compatibility of «HOTEX» with JOTUN's Pilot QD Primer alkyd soil and compliance with ISO standards for residual water-soluble substances before painting. Moreover, additional processing of the «HOTEX» surface after abrasive blast cleaning to the degree of Sa2.5 does not impair the adhesion of the coating, and a non-standard operation of converting secondary (flash) corrosion products after abrasive cleaning without removing them is also acceptable.

**Keywords:** coastal facilities of a shipyard, inhibited phosphating compound «HOTEX», paint and varnish coating system.

#### Введение

Судостроение в России благодаря особенностям географического положения страны, было и остается одной из важнейших отраслей промышленности, поэтому курс на устойчивое развитие экономики, направленный на решение накопившихся проблем с учетом экологических требований и ограничений, ставит перед учеными задачи по внедрению инновационных разработок и наилучших доступных технологий в эту отрасль.

Для районов с развитой судостроительной и судоремонтной промышленностью наиболее актуальной проблемой является загрязнение компонентов окружающей среды (особенно атмосферы), обусловленное применяющимися технологическими процессами, которые являются источниками большого количества опасных

токсичных загрязнителей атмосферы, которые могут находиться в воздухе:

- в виде летучих органических соединений (ЛОС) (к таким веществам, к примеру, относятся ксилол, метилбензол (толуол), этилбензол, формальдегид, метилэтилкетон, этиленгликоль);
- в виде твердых соединений (основными источниками поступления твердых веществ в атмосферу в судостроении являются технологические процессы, связанные со сваркой и резкой корпусных конструкций с выделением пыли, оксидов металлов; абразивной обработкой поверхностей; с окрасочными работами с выделением окрасочного аэрозоля, а также производство судов и их деталей из композитных материалов, пластмасс, сопровождающееся выбросами пыли пластмасс; с сжиганием топлива (сажа, бенз/а/пирен). В воздух выбрасываются мелкодисперсные частицы диаметром 10 мкм и



менее. Для оценки воздействия на здоровье людей используют массовые концентрации частиц менее 10 мкм (PM10) и частиц диаметром менее 2,5 мкм (PM2,5), в состав которых входят и ультрамелкодисперсные частицы, диаметр которых составляет менее 0,1 мкм;

- в виде газообразных соединений (оксиды азота (NOx), оксиды серы (SOx), оксиды углерода (COx)) [1,2].

В то же время, судостроение, являясь одной самых металлоемких отраслей современной экономики, вынуждено уделять особое внимание проблеме защиты металлов от коррозии. Основным средством противокоррозионной защиты являются, как известно, судовые лакокрасочные покрытия. В судостроении объем окрасочных работ составляет 8-10% от стоимости заказа, а при ремонте этот объем удваивается – до 18-20% [3]. При этом судостроительная верфь часть своей прибыли должна потратить на защиту от коррозии своих многочисленных береговых металлических сооружений, оборудования, технологической оснастки и пр. Предприятие заинтересовано в использовании систем лакокрасочного покрытия повышенной надежности, увеличенного межремонтного периода. Наиболее затратным (до 70% все затрат на покраску) является этап подготовки поверхностей, очистки от продуктов коррозии, грязи, старых изношенных покрытий.

Одним из лучших способов повышения долговечности покрытия является комбинированная или самостоятельная подготовка – абразивоструйная, гидроструйная или механическая в сочетании с химической обработкой фосфатирующими составами. Они облегчают удаление плотных слоев ржавчины или окалина, преобразуют продукты коррозии в имеющихся питтингах и язвах при ремонте, улучшают адгезию лакокрасочной грунтовки, способны полностью исключить процессы вторичной коррозии после очистки до нанесения грунта (вспышечная коррозия), в конечном счете, улучшают качество подготовки поверхности без привлечения дополнительных материальных и финансовых ресурсов [4-6].

Для исследования выбран химический преобразователь ржавчины «HOTEX», представляющий собой цинкфосфатный водный состав с неорганическим ингибитором коррозии анодного типа. Исследования по его защитным возможностям проводилась с отечественными лакокрасочными материалами типа грунта ЭФ-065 и эмали ЭП-1236 [7-10]. Данные о совместимости «HOTEX» с мировыми лидерами в области производства лакокрасочных материалов для судостроения в литературе отсутствуют.

Цель работы – обоснование системы покрытия с химической подготовкой поверхности под окраску составом «HOTEX».

### 1. Экспериментальные данные

Исследования проводились на лабораторных образцах стали Ст3. Образцы подвергались дробеструйной очистке до степени Sa2,5 по ISO 8501-1.

По имеющимся литературным данным при такой степени очистки состав «HOTEX» не ухудшал адгезию лакокрасочной грунтовки ЭФ-065 к металлу

даже при температуре  $-60^{\circ}\text{C}$  [7,10]. Кроме стандартной подготовки поверхности нами намеренно для сравнения выбран нетрадиционный вариант, когда после очистки образец ненадолго погружался в воду для образования на его поверхности продуктов вторичной (вспышечной) коррозии. Внешний вид таких образцов представлен на рисунке.



Рис. 1 Исходное состояние поверхности образца.

После этого все образцы подвергались фосфатированию. Рабочий состав «HOTEX» готовили из концентрата «HOTEX-K» разбавлением водой в соотношении 1:2. Обработка производилась нанесением раствора кистью два раза с промежуточной сушкой 2ч при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ . После окончательного высыхания на все образцы наносили кистью один слой быстросохнущего алкидного грунта Pilot QD Primer белого цвета. Материал любезно предоставлен нам представительством JOTUN в Санкт-Петербурге. Адгезию грунта к металлу оценивали методом решетчатых надрезов по ISO 2409. Ширина между прорезями шаблона составляла 2мм. Результаты представлены в табл.1. Как следует из приведенных данных, наличие на стандартно подготовленной поверхности стального образца продуктов преобразованной «HOTEX» вторичной коррозии не приводит к существенному снижению адгезии грунта, она находится в пределах 0-1 балла.

Таблица 1

#### Определение адгезии грунтовки методом решетчатых надрезов

№	Подготовка поверхности	Грунт	Адгезия, балл по ISO 2409
1	Дробеструйная до степени Sa2,5 + HOTEX – 2 слоя	Pilot QD Primer	0
2	То же	То же	0
3	То же	То же	0
4	Дробеструйная до степени Sa2,5. Дополнительно: преобразование продуктов вторичной коррозии HOTEX – 2 слоя	То же	1
5	То же	То же	0
6	То же	То же	1

Фосфатирующий состав «HOTEX» состоит из водорастворимых неорганических веществ, но в процессе его работы на поверхности стали

формируется мелкокристаллический слой средних (нерастворимых в воде) фосфатов цинка и железа. В отличие от неэлектропроводных добавок к преобразователям ржавчины, как, например, органических азотсодержащих соединений в [8,11], раствор «НОТЕХ» с анодным ингибитором коррозии обладает проводимостью и не должен оставлять растворимых соединений после формирования фосфатной матрицы, поскольку они стимулируют процессы разрушения лакокрасочного покрытия диффундирующей снаружи водой через слой покрытия по осмотическому механизму. Нами использован кондуктометрический метод определения проводимости водорастворимых солей по ISO 8502-9. Основным водорастворимым веществом в «НОТЕХ» является ортофосфорная кислота. Помимо стандартного теста по ISO 8502-9 мы параллельно определяли величины pH смывок с

исследуемых образцов в сравнении с той же исходной водой для смыва всех водорастворимых веществ. При таком подходе мы определяли наличие или отсутствие остаточной кислотности на образце после фосфатирования. Оставшаяся кислота способна вызвать кислотную коррозию под слоем грунта. Полученные результаты представлены в табл.2. В эксперименте использовалась дистиллированная вода.

Данные табл.2 свидетельствуют о том, что процесс фосфатирования составом «НОТЕХ» не сопровождается образованием на поверхности стали растворимых солей, в том числе свободной фосфорной кислоты. Кислота практически полностью срабатывается, а блок растворимых в воде ингибиторов коррозии оказывается надежно упакованным в матрицу мелкокристаллических нерастворимых в воде фосфатов цинка и железа.

Таблица 2

Тесты на содержание водорастворимых веществ.

№ образцов	Подготовка поверхности	ЕС, $\mu\text{S/cm}$		Содержание солей, $\text{mg/m}^2$	pH	
		Исходная вода	Вода после смыва с образца		Исходная вода	Вода после смыва с образца
1	Дробеструйная до степени Sa2,5 + НОТЕХ – 2 слоя	2,4	7,5	30,6	5,7	5,5
2	То же	2,4	7,9	33,0	5,7	5,4
3	То же	2,4	7,7	31,8	5,7	5,1
4	Дробеструйная до степени Sa2,5. Дополнительно: преобразование продуктов вторичной коррозии НОТЕХ – 2 слоя	2,4	9,0	39,6	5,7	5,1
5	То же	2,4	8,1	34,2	5,7	5,4
6	То же	2,4	7,9	33,0	5,7	5,6
				Допустимо – не более 80		

**Заключение**

С целью обоснования применения на береговых объектах судостроительной верфи экспериментально методами кондуктометрии, pH-метрии и оценки адгезии впервые подтверждена совместимость «НОТЕХ» с алкидным материалом Pilot QD Primer компании JOTUN. Обоснована применимость «НОТЕХ» в различных системах покрытия повышенной надежности для защиты от атмосферной коррозии - металлических сооружений, оборудования и пр. Для большинства

преобразователей ржавчины на основе фосфорной кислоты перед покраской требуется обмыл поверхности водой для удаления остатков кислоты. В технологии применения «НОТЕХ» эта процедура исключена, что является существенным технологическим преимуществом этого состава. В комбинации с «НОТЕХ» на верфях могут использоваться различные алкидные атмосферостойкие ЛКП [12], как специальные судовые, так и эмали типа ПФ-115, при этом срок их службы будет увеличен не менее чем в 1,5-2 раза.

**Литература**

1. Черкаев Г.В., Чихонадских Е.А. Математическое моделирование рассеивания загрязняющих веществ от судостроительного предприятия в атмосфере. // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-1 (44). С. 197-202.
2. Янин, Е. П. Коррозия металлов и металлических конструкций, как источник загрязнения окружающей среды // Пробл. окружающей среды и природ. ресурсов. — 2007. — № 6. — С. 46—69.
3. Хоникевич А.А. Химия и коррозия в судостроении. Учебное пособие // Изд-во «Судостроение». 1988. 225С.
4. Розенфельд И.Л., Персианцева В.П. Ингибиторы атмосферной коррозии // М. Наука. 1985. 279С.
5. Трусов В. И. Вопросы термодинамики ингибирования атмосферной коррозии // Защита металлов. — 1986. — Т. XXII, № 6. — С. 966—970.
6. Головин В.А., Тюрина С.А. Микрокапсулирование ингибиторов коррозии и активных добавок для противокоррозионных защитных полимерных покрытий // Коррозия: материалы, защита. 2019. №7. С.1-11.
7. Plaskeeva E. I., Trusov V.I. 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.
8. Раковская Е.Г, Ягунова Л.К., Занько Н.Г., Кудряшова О.А. Модификация преобразователей ржавчины N-содержащими органическими соединениями // Коррозия: материалы, защита. 2019. №5. С.26-30.

9. Шевченко В.Я., Шилова О.А., Кочина Т.А., Барина Л.Д., Белый О. В. Экологически безопасные защитные покрытия для транспорта // Вестник Российской академии наук. 2019. Том 89. №6. С.593-602.
10. Трусов В.И., Крымская Р.С., Грицкевич А.И. Ингибирование коррозии в системе лакокрасочного покрытия // Естественные и технические науки. 2016. №11(101) С.262-265.
11. Ovancicevic V. Inhibition of carbon-dioxide corrosion of mild-steel by imidazolines and their precursors. Corrosion. — 1999. — Vol. 55, N 5. — P. 449—455.
12. Кузьмин Ю.Л., Орыщенко А.С. Коррозия и электрохимическая защита морских судов // Профессионал, СПб, 2017 – 288с.

#### References

1. Cherkaev G.V., Chikhonadskikh E.A. Mathematical modeling of the dispersion of pollutants from a shipyard in the atmosphere. Marine Intelligent Technologies. 2019. No. 2-1 (44). S. 197-202.
2. Yanin E. P. Corrosion of metals and metal structures as a source of environmental pollution. Probl. environment and nature. resources. - 2007. - No. 6. - P. 46–69.
3. Khonikevich A.A. Chemistry and corrosion in shipbuilding. Textbook. Publishing house "Shipbuilding". 1988.225S.
4. Rosenfeld I.L., Persiantseva V.P.. Inhibitors of atmospheric corrosion. M. Nauka. 1985.279C.
5. Trusov VI Issues of thermodynamics of atmospheric corrosion inhibition. Protection of metals. - 1986. - T. XXII, No. 6. - S. 966-970.
6. Golovin V.A., Tyurina S.A. Microencapsulation of corrosion inhibitors and active additives for anti-corrosive protective polymer coatings. Corrosion: materials, protection. 2019. No. 7. S.1-11.
7. Plaskeeva E.I., Trusov V.I. 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.
8. Rakovskaya E.G., Yagunova L.K., Zanko N.G., Kudryashova O.A. Modification of rust converters with N-containing organic compounds. Corrosion: materials, protection. 2019. No. 5. S.26-30.
9. Shevchenko V.Ya., Shilova O.A., Kochina T.A., Barinova L.D., Bely O. V.. Environmentally friendly protective coatings for transport. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019. Volume 89. No6. S.593-602.
10. Trusov V. I., Krymskaya R.S., Gritskovich A.I. Corrosion inhibition in the paint-and-lacquer coating system. Natural and technical sciences. 2016. No. 11 (101) S.262-265.
11. Ovancicevic V. Inhibition of carbon-dioxide corrosion of mild-steel by imidazolines and their precursors. Corrosion. - 1999. - Vol. 55, No. 5. - P. 449–455.
12. Kuzmin Yu.L., Oryshchenko A.S. Corrosion and electrochemical protection of sea vessels. Professional, St. Petersburg, 2017 - 288 p.

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

**Екатерина Ивановна Плассеева**, аспирант, ассистент 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)

**Дарья Александровна Полянская**, студент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [polyanskaya.d@icloud.com](mailto:polyanskaya.d@icloud.com)

**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)

**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)

**Георгий Владимирович Черкаев**, доцент кафедры экологии промышленных зон и акваторий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [gcherkaev@mail.ru](mailto:gcherkaev@mail.ru)

**Ekaterina I. Plaskeeva**, Postgraduate Student Assistant 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)

**Daria A. Polyanskaya**, Student, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [polyanskaya.d@icloud.com](mailto:polyanskaya.d@icloud.com)

**Valery I. Trusov**, the professor, Dr. Sci. (Eng), the professor of 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)

**Rustam S. Khodjaev**, Assistant 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)

**Georgy V. Cherkaev**, Associate Professor, Department of Ecology of Industrial Zones and Water Areas, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [gcherkaev@mail.ru](mailto:gcherkaev@mail.ru)

Поступила в редакцию: 16.11.2020  
Принята к публикации: 12.02.2021

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

УДК 621.77

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.029

### Анализ способов изготовления разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей и выбор инструмента для его реализации

К.С. Вахрушев<sup>1</sup> e-mail: omd4nik@list.ru, В.Б. Дементьев<sup>1</sup> e-mail: demen@istu.ru,  
А.Э. Пушкарев<sup>1</sup> e-mail: pushkarev@istu.ru, А.П. Блинков<sup>2</sup> e-mail: blinkov@smtu.ru

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация:** Рассматривается возможность интенсификации процесса изготовления разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей, используемых в судовых энергоустановках и пусковых устройствах для запуска подводных и летательных беспилотных аппаратов, и их элементов, испытывающих многократные нагрузки в период эксплуатации. Для выбора наиболее рационального и эффективного способа изготовления применен функционально-структурный анализ используемого оборудования для изготовления внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей, с помощью которого найдены закономерности процесса. Выявленный способ обработки, оборудования и применяемый инструмент являются наименее затратными и наиболее эффективными для выполнения необходимых технических требований. При проведении анализа зон локальных деформаций выявлен ряд зависимых величин, влияющих на конечное усилие и степень деформации при изготовлении разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей.

**Ключевые слова:** Внутренние пазы, обработка корпусных трубных деталей, функционально-структурный анализ, штамповка в обкатывающем инструменте.

### Analysis method of manufacturing process of the multi-directional internal screws of the pipe hull parts and tool selection for implementation

Konstantin S.Vahrushev<sup>1</sup> e-mail: omd4nik@list.ru, Vyacheslav B. Dementiev<sup>1</sup> e-mail: demen@istu.ru,  
Andrei E.Pushkarev<sup>1</sup> e-mail: pushkarev@istu.ru, Alexey P. Blinkov<sup>2</sup> e-mail: blinkov@smtu.ru

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russian Federation, <sup>2</sup>St. Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation

**Abstract.** The following analysis deal with the possibility of intensification for the manufacturing process of the multi-directional internal screws of the pipe hull parts, used in the ship power plants and launch devices to launch submarine and unmanned aerial vehicles as well as their elements, which experience multiple loads during their period of operation. Functional-structural analysis of the equipment, used for the manufacturing of the internal screws of the pipe hull parts, has been applied in deciding the most rational and efficient way of production. This analysis helps to find process patterns. The revealed way of machining, used equipment and the applied instrument provide the least expensive and the most effective results to execute necessary technical requirements. During executing local deformation areas analysis, there have been revealed a number of dependent values which make an impact on the final force as well as the deformation degree when manufacturing multi-directional internal screws of the pipe hull parts.

**Key words:** Internal screws, pipe hull parts machining, functional structural analysis, stamping in the cutting matrix.

#### Введение

Производственные процессы изготовления разнонаправленных внутренних винтовых пазов в машиностроении являются многопереходными процессами, состоящими из большого числа технологических операций, являющимися совокупностью действий людей и орудий производства, необходимых для изготовления или ремонта корпусных трубных деталей. Отличия производственных процессов проявляются в особенностях технологических процессов, включающих разные виды обработки заготовок и деталей. Актуальным является анализ способов и инструмента для изготовления деталей данного типа с учетом выполнения технических требований и характеристик, предъявляемых к разнонаправленным винтовым пазам на внутренней поверхности изделий.

Изделия, в которых имеется такой тип винтовых пазов, разнообразны и встречаются в различных областях народного хозяйства.

К внутренним винтовым пазам относятся пазы в направляющих стартовых устройств подводных и летательных аппаратов, рассмотренных, например, в полезных моделях [1] и [2]. В конструкции [3] направляющие, снабженные продольными пазами на внутренней поверхности корпуса, обеспечивают запуск и вращение запускаемых аппаратов для обеспечения движения по заданной траектории. Данные сложные пазы в направляющих возможно получить операциями механической обработки, или с помощью пластической деформации роликами прямым и обратным способом [4]. С помощью роликов обработка проходит на оправке с помощью трех локальных зон деформации, поэтому обработка внутренних и наружных поверхностей трубных заготовок производится разным инструментом и имеет различные качества и характеристики.



Подобные пазы характерны также для амортизационных устройств. Например, в [5] пазы используются для виброгашения и жесткого крепления тросовых стержней. В секции подводного аппарата [6] внутреннюю часть корпуса, выполненную из двояковогнутых пластин, возможно выполнить цельной за счет применения полостей из трубной заготовки, и тем самым повысить жесткость всей конструкции. Одним из технических решений проблем, выявленных в работе [7], является применение для подачи жидкости в систему деаэрации трубных деталей с продольно-поперечными пазами. Вышеназванные виды пазов могут формироваться в лазерно-плавильных установках [8, 9]. Однако этот способ получения внутренних пазов и полостей в цилиндрических деталях имеет ряд ограничений: необходимость проведения дополнительной термической обработки в связи с упрочнением обработанных поверхностей; затрудненность дополнительной механической обработки после воздействия лазера.

Одно из применений различных пазов в трубных заготовках – стволы корабельных и береговых орудий. Основные параметры и характеристики внутренних винтовых пазов и особенности их получения описаны в работах [10–12]. Основными функциями пазов в стволах являются:

- направление полета снаряда по нарезанным каналам ствола (пазам);
- придание вращения снаряду для обеспечения дальности и стабильности траектории движения.

Данные функции пазов влияют на дальность, точность и эффективность всего изделия в целом. Технологическими операциями, позволяющими получить внутренние нарезки, является дорнование ствольных цилиндрических трубных заготовок [13]. Однако имеющееся оборудование не дает

возможности проведения данной технологической операции на трубных заготовках большого диаметра.

Современна и актуальна проблема совершенствования технологии получения внутренних рифлей, образующих ромбические элементы, равномерно распределенные на внутренней поверхности корпусов неуправляемых авиационных ракет, размещаемых на самолетах и вертолетах корабельного базирования.

Используемые в данный момент технологии прямого редуцирования, изложенные в работах [14] и [15], не способствуют получению оптимальных конфигураций и геометрических параметров рифлей, которые непосредственно влияют на тактико-технические характеристики снаряда: отклонение по дальности разлета осколков, площадь разлета и число осколков.

Анализ и синтез процесса проведен для технологии изготовления сложных разнонаправленных винтовых внутренних пазов трубных корпусных деталей путем составления функционально-структурной модели и разобран на примере [16].

Отличительной чертой при анализе является выделение отдельных факторов, влияющих на такие функции, как получение каждой из поверхностей заготовки, подвергающихся обработке; силовые и приводные агрегаты, обеспечивающие перемещение рабочих органов оборудования и перемещения обрабатываемой детали; механизм съема заготовки, определяющий технологичность производства корпусов с винтовых внутренних полостей. Структурная модель, приведенная на рис. 1, отображает исключительно постоянные связи. Выбор технологического процесса обуславливается использованием наиболее распространенного и унифицированного оборудования в процессе изготовления необходимых изделий.



Рис. 1. Структурная модель оборудования для получения винтовых внутренних полостей трубных деталей

Анализ оборудования для производства сложных разнонаправленных винтовых внутренних полостей трубных корпусных деталей, где были рассмотрены различные виды оборудования, такие как токарно-винторезные станки для получения насечек в трубных ствольных заготовках, фрезерные станки и лазерные обрабатывающие центры проведен в [17];

для получения направляющих пазов в стартовых установках для запуска беспилотных летательных аппаратов, горизонтальные гидравлические прессы для накатки насечек способом ротационной вытяжки осесимметричных оболочек из анизотропных материалов с разделением очага деформации – в [18].

Исходя из анализа применения вышеуказанных видов оборудования и применяемого инструмента наименее затратным и наиболее эффективным оборудованием является штамповка на гидравлических вертикальных прессах, позволяющих применить способ редуцирования, поскольку последние имеют наиболее надежную двигательную часть, состоящую из стандартных источников, накопителей, передатчиков энергии, обеспечены независимыми и надежными приводами как прямого, так и обратного хода, надежной литой станиной, воспринимающей достаточные прямые и боковые виды нагрузок на составные части, обладают возможностью использования широкого

спектра инструмента для деформирования заготовок, снабжены возможностью применения обратного цилиндра для съема и извлечения заготовки из инструмента во время обратного хода подвижных частей оборудования. Все вышеперечисленные преимущества позволяют выбрать не только наиболее универсальное оборудование для получения сложных винтовых внутренних полостей в трубных корпусных изделиях, но и перейти к выбору технологии производства данных изделий и инструмента для ее реализации.

На рис. 2 приведена функционально-структурная модель процесса.

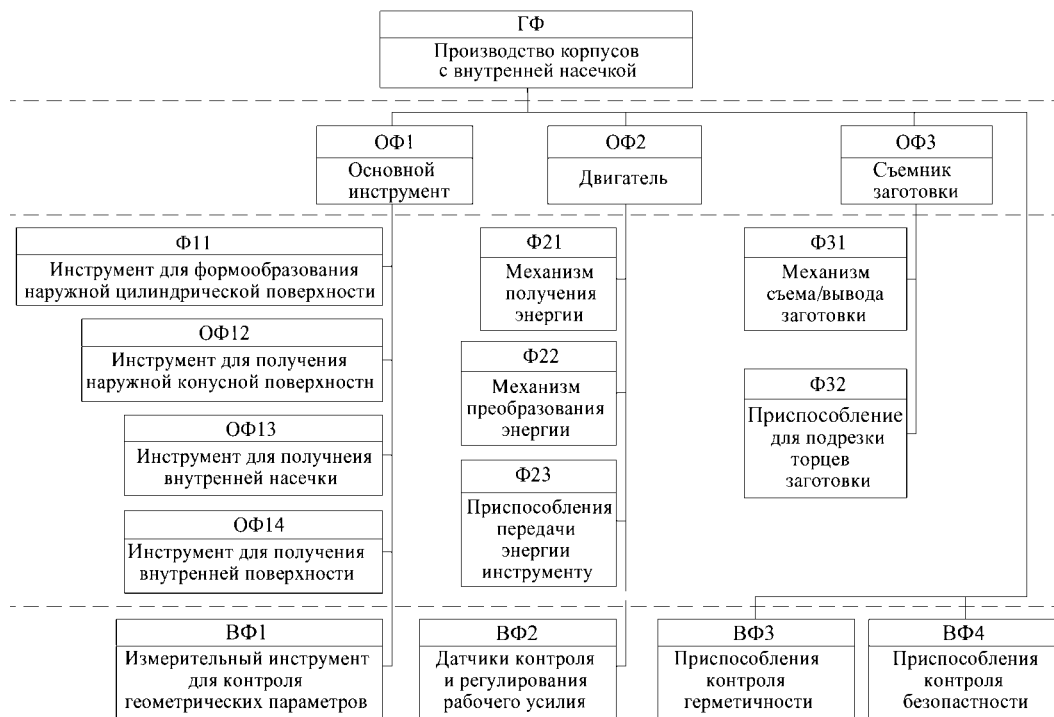


Рис. 2. Функционально-структурная модель технологии производства трубных корпусных деталей со сложными внутренними полостями: ГФ – главная функция, ОФ – основная функция, Ф – функция, ДФ – дополнительные функции

Результаты проведенного функционально-структурного анализа отражают реальные характеристики, заключенные в динамических функциональных отношениях. Так, при проведении анализа синтезирован ряд закономерностей, проведена оценка вышеприведенных технологических процессов и выявлен ряд недостатков.

1. Технологический процесс деформации роликами требует придания дополнительного движения обкатываемому инструменту помимо движения подачи заготовки с оправкой внутри, что приводит к необходимости увеличения ресурсов для выполнения функций Ф23 и Ф21. Важным фактором является необходимость синхронизации работы двигателей и приводных механизмов, что усложняет конструкцию механизма, требуемую для выполнения функции Ф22. Кроме того, существует проблема локальности зон пластической деформации заготовки, что может привести к невыполнению требований по качеству наружной поверхности корпусных цилиндрических деталей с внутренними

пазами.

2. Обработка в лазерно-плавильных установках имеет ограничения по выполнению функции Ф14, поскольку высокотемпературная обработка не дает конечных размеров внутренних разнонаправленных пазов и требует дополнительной термической и механической доработки корпусных цилиндрических деталей. Также обеспечение энергией функцией Ф23 является затратным и трудоемким процессом.

3. Факторы специального оборудования и предварительной механической обработки внутренних поверхностей влияют на выполнение функций Ф11 и Ф13 по формированию внутренней поверхности заготовки и формирование пазов дорнованием, а также приводят к дополнительным затратам энергии и многопереходности процесса.

4. Процесс получения внутренних полостей трубных корпусных деталей ограничивается возможностями подачи инструмента внутрь заготовки Ф23 и переналадки или дополнения текущих возможностей оборудования упорами или

люнетами, тем самым усложняя выполнение функции Ф32. Также механическая или лазерная обработка может потребовать дополнительного оснащения держателями, упорами, специализированной оснасткой для обрабатывающих центров или лазерных установок в связи с увеличением затрат на выполнение функции Ф12.

5. Процесс редуцирования корпусов в неподвижной матрице имеет существенный недостаток, связанный с дополнительными затратами для выполнения технологической операции по выпрессовке пуансона из заготовки и заготовки из инструмента. Поскольку выпрессовку винтового пуансона при редуцировании в неподвижной матрице невозможно провести на полную длину заготовки без смятия первого ряда винтовых канавок на заготовке, операция выпрессовки пуансона проходит в два перехода и с применением более короткого пуансона. Данная особенность процесса редуцирования в неподвижной матрице является причиной увеличения ресурсо- и энергозатрат, необходимых для выполнения функции Ф31.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что наиболее рациональным технологическим процессом, который обеспечивает выполнение всех вышеперечисленных функций изготовления разнонаправленных внутренних пазов трубных корпусных деталей является штамповка в обкатывающем инструменте. Для реализации процесса необходимо более подробно рассмотреть инструмент для реализации процесса изготовления разнонаправленных внутренних пазов, выбрав наиболее рациональную схему деформации заготовки и инструмент для расчета факторов, влияющих на силовые характеристики процесса формирования пазов на внутренних поверхностях цилиндрических деталей.

Штамповки обкатыванием заключается в обкатывающем движении инструмента по заготовке. При этом траектория движения инструмента, благодаря оси наклона, представляет собой окружность. За время одного цикла при объемной штамповке обкатыванием, независимо от траектории движения, пластической деформации подвергается вся заготовка по окружности. Для реализации процессов в очаге деформации необходимо наличие поступательного движения инструмента от ползуна пресса или эквивалентного ему перемещения через зону деформации заготовки и движения обкатывания инструмента от отдельного привода. Совмещение этих двух движений приводит к винтообразному перемещению локального очага пластической деформации по заготовке. При круговом обкатывании инструмента локальная поверхность контакта инструмента с деформируемой заготовкой вращается с заданной частотой. Взаимодействие между инструментом и заготовкой осуществляется путём качения инструмента по деформируемой заготовке [19].

Описанная технология осуществляется с помощью устройства [20], которое содержит станину с закрепленным на ней коробом, внутри которого размещена матрица с центральным конусным отверстием, снабженная механизмом колебательного движения; две колонны, на которых

закреплена верхняя неподвижная опора, снабженная рабочим гидроцилиндром, на плунжере которого установлен ползун, снабженный пуансонодержателем с установленным в нем пуансоном, при этом на нижнем торце пуансонодержателя на подшипниковой паре установлена втулка. Отличает устройство от известных аналогов то, что пуансон выполнен комбинированным, состоящим из цилиндрической и винтовой частей; в цилиндрической части пуансона выполнены два глухих диаметрально противоположных отверстия, а в корпусе пуансонодержателя два соответствующих упомянутым отверстиям винтовых пазов, с возможностью установки в пазах пальцев и их запрессовки в глухие отверстия, при этом направляющей первого паза является левая спираль, а второго – правая; дополнительно в нижней части станины соосно пуансонодержателю установлен механизм выпрессовки, состоящий из возвратного гидроцилиндра с установленным на нем выталкивателем, а в конусном отверстии закреплен тензометрический датчик; выход датчика подключен к измерительному входу блока управления, а его силовые выходы подключены к рабочему и возвратному гидроцилиндрам. За каждый полный цикл обкатывания инструмент или заготовка перемещается в осевом направлении на величину подачи. Основная функция, выполняемая данным инструментом – это проведение операции по нанесению разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей за один ход, при этом обработку с помощью пластической деформации получают все без исключения поверхности заготовки.

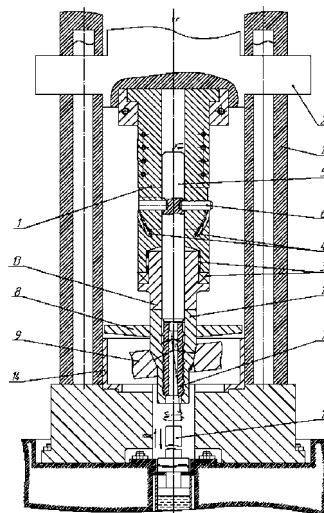


Рис. 3. Устройство для формирования пазов в обкатывающем инструменте:

- 1 – пуансонодержатель; 2 – ползун пресса; 3 – подшипниковая пара; 4 – винтовые пазы; 5 – цилиндрический пуансон; 6 – стопорные пальцы; 7 – винтовой пуансон; 8 – втулка-съёмник; 9 – матрица; 10 выталкиватель; 11 – заготовка; 12 – направляющие пресса; 13 – втулка-направляющая; 14 – механизм колебательного движения

Из анализа различных схем расположения центра обкатывающего инструмента [219] выбрана схема, в которой центр обкатывания находится на входе в

обкатывающую матрицу. Наиболее важным при выборе данной схемы стало отсутствие изгибающих смещений заготовки на входе в матрицу относительно оси подачи, чего удается достичь за счет выбора длин контактных поверхностей матрицы  $L$ , величины подачи пресса, угла наклона матрицы относительно оси подачи  $Q$ .

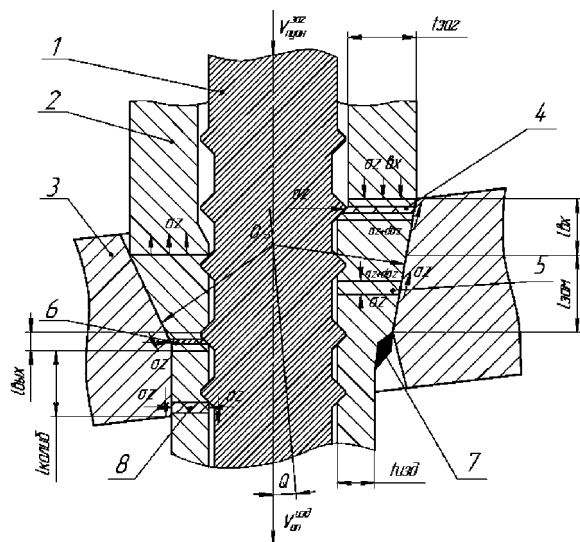


Рис. 4. Схема разбивки зональной деформации заготовки:

1 – винтовой пуансон, 2 – заготовка, 3 – обкатывающая матрица, 4–8 – локальные зоны деформации

На рис. 4 входная зона 4 имеет отличительные признаки от обычной конической матрицы. Осевые усилия во входной зоне необходимо рассматривать в правой и левой зоне замкнутого локального контакта. Зона замкнутого контакта 5 представлена и на правой и левой стороне заготовки и матрицы. Зона характеризуется наибольшей величиной деформации заготовки и принимает основное участие в формировании насечек на внутренних поверхностях трубной заготовки. Выходная зона деформации 6 отличается наличием участка вторичной деформации 7, в котором происходит дополнительное формирование зазора между инструментом и заготовкой, облегчая при этом выталкивание инструмента из заготовки и обеспечивая проведение всей операции по получению внутренней насечки за один ход пресса. Участок 8 – калибровочный пояс, который позволяет улучшить качество наружных и внутренних поверхностей заготовки за счет незначительного обжима уже продеформированных поверхностей корпуса трубной цилиндрической заготовки.

Определение осевого усилия в общем виде проводится согласно рис. 4 по следующей формуле:

$$P = 1,57 \cdot d_{из} \cdot t_{из} \cdot \left\{ \sigma_{z, \text{зам.л}} + \left[ 1 + \left( l_{\text{вх.л}} - l_{\text{вх.н}} \right) \sin(\alpha + \theta) \right] \sigma_{z, \text{зам.п}} + F_{\text{вт.деф}} \cdot \sigma_s \right\} (1)$$

где  $F_{\text{вт.деф}}$  – площадь зоны вторичной деформации металла,  $\sigma$  – осевые напряжения на локальных участках заготовки,  $\sigma_s$  – окружное сжимающее напряжение в зоне вторичной деформации,  $l_i$  – длины локальных зон деформации,

$d_{из}$  – диаметр изделия,  $t_{из}$  – толщина стенки изделия,  $\alpha$  – угол наклона матрицы к горизонтальной плоскости,  $\theta$  – угол наклона оси инструмента к оси симметрии инструмента.

Для расчета значения осевого усилия и степени деформации в каждой из замкнутых локальных зон необходимо провести многофакторный расчет, с помощью программы, реализованной на ЭВМ [22]. Результатами данного расчета стало выявление снижения в 1.5–2 раза осевого усилия, а также нахождение оптимальных параметров величины подачи пресса, угла наклона заготовки и деформирующего инструмента.

### Заключение

1) По результатам проведенного функционально-структурного анализа способов и технологий изготовления разнонаправленных внутренних винтовых пазов в различных корпусных изделиях и их влияние на функции изделия в целом: в судовых энергоустановках, пусковых устройствах для запуска подводных и летательных беспилотных аппаратов, стволах орудий, корпусах боеприпасов, выбран наиболее оптимальный и экономичный способ штамповки в обкатывающем инструменте.

2) Применение штамповки в обкатывающем инструменте позволяет выполнить операцию по получению внутренних винтовых пазов с помощью длиноходовых гидравлических вертикальных прессов, имеющих независимые и надежные приводы как прямого, так и обратного хода, обладающих возможностью применения обратного цилиндра для съема и извлечения заготовки за один проход.

3) Все необходимые технические требования по видам и качеству обработки трубных цилиндрических деталей с внутренней насечкой решены с помощью применяемого инструмента, траектория движения которого, благодаря углу наклона оси, представляет собой обкатывающую окружность на наружной и внутренней поверхностях заготовки. За время одного цикла при объемной штамповке в обкатывающем инструменте, пластической деформации подвергается вся заготовка по окружности и проталкивание по направлению движения пресса позволяет проводить деформацию трубной заготовки в необходимый размер. Совмещение этих двух движений приводит к винтообразному перемещению локального очага пластической деформации по заготовке.

4) Приведенные в работе схема инструмента и схема зон деформации штамповки обкатыванием наглядно демонстрируют наличие действия зоны вторичной деформации, позволяющей получить необходимый зазор между инструментом и заготовкой, тем самым сократить и упростить технологический цикл производства разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей.

5) В процессе математического анализа степеней деформации и усилия прессования выявлено влияние различных факторов на эффективность процесса: величины подачи, угла наклона матрицы относительно оси подачи, длины локальных зон деформации.



### Литература

1. Патент на полезную модель 249 7725 Рос. Федерация. Катапульта для взлета летательного аппарата / Громов В.В., Грушин К.А. и др.; опубл. 10.11.2013. Бюл. № 31.
2. Патент на полезную модель 116619 Рос. Федерация. Пусковое устройство для подводных аппаратов/ О.И. Ефимов, А.В. Красильников № 2012101030/11 ; заявка 11.01.2012 Опубл. 27.05.2012 бюл.№15.
3. Патент на полезную модель 98396 Рос. Федерация. Катапульта / Г.С. Аленченков, А.Э. Пушкарев. №2010119280/11; опубл. 20.10.2010. Бюл. № 29.
4. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Осипова Е.В., Ларина М.В. Ротационная вытяжка осесимметричных оболочек из анизотропных материалов с разделением очага деформации // Известия ТулГУ. Техническая наука. 2014. Вып 11. С. 108–111.
5. Патент 2550583 Рос. Федерация № 2014100557/11 Амортизатор / М.А. Минасян, А.М. Минасян: заявка 09.01.2014 Опубл. 10.05.2015 бюл.№13.
6. Патент 2651941 Рос. Федерация № 2017110350 Рос. Федерация. Секция корпуса подводного аппарата/ А.И. Фрумен, В.С. Дмитриев, С.В. Дмитриев №
7. Р.А. Никонова, Д.Р. Дрягина, И.К. Крутова Водоподготовка на судах: подбор необходимого оборудования для подготовки воды для нужд судового котла. – СПб МГТУ, 2019 -95 с.
8. Сибикин М.Ю. Металлообработка. Стратегия повышения эффективности. – Москва: Директ-Медиа, 2018. – 189 с.
9. Физические основы лазерной обработки материалов. – Томск: ТПУ, 2011. – 199 с.
10. Зайцев А.С. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 387с.
11. Бельков В.А., Халапханов В.Т. Криминалистическое исследование огнестрельного оружия: учеб. пособие. – Иркутск: Иркут. инст-т (фил.) ВГУЮ, 2016. – 206 с.
12. Елисеев Э.А., Тонышева А.О., Якушева Н.А. Материалы и развитие технологий, обеспечивающие ресурс стволов артиллерийских, танковых и стрелковых систем вооружения // Труды ВИАМ, 2017 № 9.
13. Арляпов А.Ю., Бознак А.О., Солоха А.И. Применение пластического растяжения с малыми деформациями для снижения остаточных напряжений в обработке дорнованием толстостенных цилиндров // сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции. – НИТПУ, 2016. – С. 334–335
14. Митин О.Н., Иванов Ю.А. Оценка силовых режимов операции редуцирования профильным пуансоном трубной заготовки через коническую матрицу // Известия ТулГУ. Техническая наука. 2015. Вып.№ 3. С. –1-65.
15. Митин О.Н. Формирование винтовых рифтов на внутренней поверхности цилиндрического стакана // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 3. С. 548–552.
16. Аленченков И.С., Пушкарев А.Э. Функционально- структурный анализ и синтез механизмов роторной линии // Вестник ИжГТУ. 2011 №2(50) С. 7–11.
17. Говоров Ю.В. Фрезерная обработка поверхностей по траекториям обработки в виде В-сплайнов // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. – М.: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). 2015 № 11 С. 77–31.
18. Трегубов В.И., Ларин С.Н. и др. Силовые режимы операции ротационной вытяжки трубных заготовок по трехроликовой схеме пластического деформирования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016 Вып. 5. С 44–51.
19. Патент 2693666 Рос. Федерация № 2017137472 Способ получения внутренней насечки трубных деталей / К.С. Вахрушев, Н.А. Корякин; заявл. 25.10.2017, опубл. 03.07.2019 Бюл. №10.
20. Патент на полезную модель 179571 Рос. Федерация Устройство для формообразование внутренних рифлей трубных деталей / К.С. Вахрушев, Н.А. Корякин; опубл. 17.05.2018. Бюл. №14.
21. Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.
22. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017612371. Программа для расчета усилия штамповки трубных корпусных деталей с ослабляющей внутренней насечкой / К.С. Вахрушев, Н.А. Корякин и др. Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 20.02.2017.

### References

1. Patent na poleznuyu model' 249 7725 Ros. Federaciya. Katapul'ta dlya vzleta letatel'nogo apparata [The patent for useful model 249 7725 ROS. Federation. Catapult for taking off an aircraft]/ Gromov V.V., Grushchin K.A. i dr.; opubl. 10.11.2013. Byul. № 31.
2. Patent na poleznuyu model' 116619 Ros. Federaciya. Puskovoe ustrojstvo dlya podvodnyh apparatov [The patent for useful model 116619 ROS. Federation. Launching device for underwater vehicles]/ O.I. Efimov, A.V. Krasil'nikov № 2012101030/11 ; zayavka 11.01.2012 Opubl. 27.05.2012 byul.№15.
3. Patent na poleznuyu model' 98396 Ros. Federaciya. Katapul'ta [Utility model patent 98396 ROS. Federation. Catapult]/ G.S. Alenchenkov, A.E. Pushkarev. №2010119280/11; opubl. 20.10.2010. Byul. № 29.
4. YAKovlev S.S., Tregubov V.I., Osipova E.V., Larina M.V. Rotacionnaya vytyazhka osesimmetrichnyh obolochek iz anizotropnyh materialov s razdeleniem ochaga deformacii [Rotary extraction of axisymmetric shells made of anisotropic materials with separation of the deformation center]// Izvestiya TulGU. Tekhnicheskaya nauka. 2014. Vyp 11. S. 108–111.

5. Patent 2550583 Ros. Federaciya № 2014100557/11 Amortizator [Patent 2550583 ROS. Federation No 2014100557/11 Shock Absorber] / M.A. Minasyan, A.M. Minasyan: заявка 09.01.2014 Opubl. 10.05.2015 byul.№13.
6. Patent 2651941 Ros. Federaciya № 2017110350 Ros. Federaciya. Sekciya korpusa podvodnogo apparata [Patent 2651941 ROS. Federation No. 2017110350 ROS. Federation. Section of the hull underwater vehicle]/ A.I. Frumen, V.S. Dmitriev, S.V. Dmitriev №
7. R.A. Nikonova, D.R. Dryagina, I.K. Krutova Vodopodgotovka na sudah: podbor neobhodimogo oborudovaniya dlya podgotovki vody dlya nuzhd sudovogo kotla. [Water treatment on ships: selection of the necessary equipment for water treatment for the needs of the ship's boiler] – SPB MGTU, 2019 -95 s.
8. Sibikin M.YU. Metalloobrabotka. Strategiya povysheniya effektivnosti. [Metalworking. The strategy of increasing the efficiency] – Moskva: Direkt-Media, 2018. – 189 s.
9. Fizicheskie osnovy lazernoj obrabotki materialov.[ Physical bases of laser processing of materials] – Tomsk: TPU, 2011. – 199 s.
10. Zajcev A.S. Ustrojstvo i proektirovanie stvolov artillerijskih orudij [Device and design of artillery barrels]. – Staryj Oskol: TNT, 2017. – 387s.
11. Bel'kov V.A., Halaphanov V.T. Kriminalisticheskoe issledovanie ognestrel'nogo oruzhiya: ucheb. posobie. [Forensic investigation of firearms: studies. stipend] – Irkutsk: Irkut. inst-t (fil.) VGUYU, 2016. – 206 s.
12. Eliseev E.A., Tonyshcheva A.O., YAKusheva N.A. Materialy i razvitie tekhnologij, obespechivayushchie resurs stvolov artillerijskih, tankovyh i strelkovyh sistem vooruzheniya [Materials and development of technologies that ensure the life of the barrels of artillery, tank and rifle weapons systems] // Trudy VIAM, 2017 № 9.
13. Arlyapov A.YU., Boznak A.O., Soloha A.I. Primenenie plasticheskogo rastyazheniya s malymi deformatsiyami dlya snizheniya ostatocnyh napryazhenij v obrabotke dornovaniem tolstostennyh cilindrov [Application of plastic stretching with small deformations to reduce residual stresses in the mandrel treatment of thick-walled cylinders]// sbornik trudov HIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – NITPU, 2016. – S. 334–335
14. Mitin O.N., Ivanov YU.A. Ocenka silovyh rezhimov operacii reducirovaniya profil'nym puansonom trubnoj zagotovki cherez konicheskuyu matricu [Evaluation of the power modes of the operation of reducing a pipe billet with a profile punch through a conical matrix] //Izvestiya TulGU. Tekhnicheskaya nauka. 2015. Vyp.№ 3. S. –1-65.
15. Mitin O.N. Formirovanie vintovyh riftov na vnutrennej poverhnosti cilindricheskogo stakana [Formation of screw rifts on the inner surface of a cylindrical Cup]// Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013. Vyp. 3. S. 548–552.
16. Alenchenkov I.S., Pushkarev A.E. Funkcional'no- strukturnyj analiz i sintez mekhanizmov rotornoj linii [Functional and structural analysis and synthesis of mechanisms with rotary line] // Vestnik IzhGTU. 2011 №2(50) S. 7–11.
17. Govorov YU.V. Frezernaya obrabotka poverhnostej po traektoriyam obrabotki v vide V-splajnov [Milling of surfaces along processing paths in the form of B-splines] // Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta .– M.: Moskovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya (MIIT). 2015 № 11 S. 77–31.
18. Tregubov V.I., Larin S.N. i dr. Silovye rezhimy operacii rotacionnoj vytyazhki trubnyh zagotovok po trekhrolikovoj skheme plasticheskogo deformirovaniya [Power modes of operation of rotary drawing of pipe billets according to the three-roller scheme of plastic deformation]// Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2016 Vyp. 5. S 44–51.
19. Patent 2693666 Ros. Federaciya № 2017137472 Sposob polucheniya vnutrennej nasechki trubnyh detalej [Patent 2693666 ROS. Federation No. 2017137472 method for obtaining internal notches of pipe parts] / K.S. Vahrushev, N.A. Koryakin; zayavl. 25.10.2017, opubl. 03.07.2019 Byul. №10.
20. Patent na poleznuyu model' 179571 Ros. Federaciya Ustrojstvo dlya formoobrazovanie vnutrennih riflej trubnyh detalej [Utility model patent 179571 ROS. Automatic device for forming internal corrugations of pipe parts] / K.S. Vahrushev, N.A. Koryakin; opubl. 17.05.2018. Byul. №14.
21. Voroncov A.L. Teoriya i raschety processov obrabotki metallov davleniem [Theory and calculations of metal forming processes]. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014. 396 s.
22. Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlya EVM № 2017612371.[ Certificate of official registration of the computer program No. 2017612371] Programma dlya rascheta usiliya shtampovki trubnyh korpusnyh detalej s oslablyayushchej vnutrennej nasechkoy / K.S. Vahrushev, N.A. Koryakin i dr. Zaregistr. v reestre programm dlya EVM 20.02.2017.

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

**Константин Сергеевич Вахрушев**  
 udinui@rambler.ru аспирант, Ижевский  
 государственный технический университет имени  
 М.Т. Калашникова, 426069, Ижевск, ул.  
 Студенческая, 7, e-mail: [omd4nik@list.ru](mailto:omd4nik@list.ru), тел. 8-909-  
 055-14-75

**Konstantin S. Vahrushev**, postgraduate, Kalashnikov  
 Izhevsk State Technical University, 7, Studencheskay  
 str., 426069, Izhevsk, Russian Federation, e-mail:  
[omd4nik@list.ru](mailto:omd4nik@list.ru), phone 8-909-055-14-75

**Вячеслав Борисович Деметьев**, заведующий  
 кафедрой, доктор технических наук, доцент,  
 Ижевский государственный технический университет  
 имени М.Т. Калашникова, 426069, Ижевск, ул.  
 Студенческая, 7, e-mail: [demen@istu.ru](mailto:demen@istu.ru)

**Vyacheslav B. Dementiev**, Dr.Sci.Tech., associate  
 professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical  
 University, 7, Studencheskay str., 426069, Izhevsk,  
 Russian Federation, e-mail: [demen@istu.ru](mailto:demen@istu.ru)

**Андрей Эдуардович Пушкарёв**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 7, e-mail: [pushkarev@istu.ru](mailto:pushkarev@istu.ru)

**Алексей Павлович Блинков**, заместитель начальника Управления оборонных исследований и разработок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [blinkov@smtu.ru](mailto:blinkov@smtu.ru)

**Andrei E. Pushkarev**, Dr.Sci.Tech., professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7, Studencheskay str., 426069, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: [pushkarev@istu.ru](mailto:pushkarev@istu.ru)

**Alexey P. Blinkov**, Deputy head of the Department of defense research and development, Saint-Petersburg State Marine Technical University, 3, Lotsmanskaya str., 190121, St. Petersburg, The Russian Federation, e-mail: [blinkov@smtu.ru](mailto:blinkov@smtu.ru)

Поступила в редакцию: 28.05.2020

Принята к публикации: 12.02.2021

## Возможности применения водотопливной эмульсии с целью расширения рабочего диапазона дизеля и совершенствования процессов топливоподачи

А.Ю. Чистяков<sup>1</sup> e-mail: glucker2000@mail.ru, Г.Б. Горелик<sup>2</sup> e-mail: ggorelik@mail.ru,  
О.Н. Мозолев<sup>2</sup> e-mail: oleg19793@yandex.ru

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

<sup>2</sup>Тихоокеанский государственный университет

**Аннотация** В статье представлены результаты математического моделирования процессов топливоподачи судового дизеля при работе по винтовой характеристике при использовании дизельного топлива и водотопливной эмульсии с водосодержанием 30% в качестве альтернативного топлива. В результате исследования выявлены особенности процессов топливоподачи и влияние альтернативного топлива на рабочие характеристики впрыскивания серийной топливной аппаратуры при работе на номинальном и частичных режимах. При оценке качества работы топливной аппаратуры учитывались: изменение характеристики подачи топлива; особенности распыливания топлива в начальной и конечной фазах впрыскивания; повышение стабильности последовательных циклов впрыскивания за счет увеличения активного хода плунжера; колебания остаточного давления в трубопроводе высокого давления при последовательных циклах впрыскивания. При применении водотопливной эмульсии возможно существенное повышение качества работы судового дизеля, расширение диапазона стабильных подач серийной топливной аппаратуры как за счет возможности снижения скоростных режимов при малых подачах топлива, так и обеспечения форсированных подач топлива вследствие отсутствия повторных впрыскиваний.

**Ключевые слова:** водотопливная эмульсия; критерий стабильности; рабочие процессы дизельной топливной аппаратуры; математическое моделирование процессов топливоподачи судового дизеля; распыливание топлива; характеристика подачи топлива; последовательные циклы впрыскивания, остаточное давление; межцикловая нестабильность.

## Possibilities of using water-fuel emulsion in order to extend the diesel operating range and improvement of fuel supply processes

Alexandr Yu. Chistyakov<sup>1</sup> e-mail: glucker2000@mail.ru, Gennadiy B. Gorelik<sup>2</sup> e-mail: ggorelik@mail.ru, Oleg N. Mozolev<sup>2</sup> e-mail: oleg19793@yandex.ru

<sup>1</sup>State marine technical university of Saint-Petersburg, Saint-Petersburg, Russian, Federation <sup>2</sup>Pacific National University Khabarovsk, Russian, Federation

**Abstract** The article presents the results of the mathematical modeling of marine diesel's fuel supply processes during the screw characteristic while using diesel fuel and water-fuel emulsion with 30% water content as alternative fuel. As a result of the research, the features of the fuel supply processes and the effect of alternative fuel on the serial fuel equipment injection characteristics during operation in nominal and partial modes were identified. Considering the quality of fuel equipment operation the following features were taken into account, they are: changing fuel supply characteristics; features of fuel atomization in the initial and final phases of injection; increasing stability of the injection in sequential cycles by increasing plunger active stroke; residual pressure oscillations in the high pressure line during injection consecutive cycles. Using the water-fuel emulsion it is possible to significantly increase a quality of marine diesel engine operation, to extend the stable fuel supply range of the serial fuel equipment both from the possibility of speed modes reducing during fine fuel feed and providing forced fuel feed due to absence of repeating injections.

**Keywords:** water-fuel emulsion; stability criterion; operating processes of diesel fuel equipment; mathematical modeling of marine diesel's fuel supply processes; characteristics of fuel supply processes; sequential injection cycles, residual pressure; intercycle instability.

### Введение

Расширение диапазона стабильных подач топливной аппаратуры (ТА) судовых дизелей – актуальная задача современного дизелестроения. Она выполняется в первую очередь путем форсирования подачи топлива при повышении мощности существующих дизелей с учетом ограничений, связанных с появлением повторных впрыскиваний, с другой стороны – обеспечением стабильных от цикла к циклу подач на режимах минимальных оборотов с целью дальнейшего снижения минимальной частоты вращения двигателя под нагрузкой и холостом ходе при работе по винтовой характеристике с выполнением требований ГОСТ 10150-88 (эти требования не обеспечивает ни один из отечественных дизелей).

Таким образом, состояние вопроса следующее: убрать повторные впрыскивания на верхнем диапазоне мощностей при форсировании дизелей, что практически не удается. В результате большинство известных двигателей имеют повторные впрыскивания на номинальном режиме работы порядка 5-9 %. Это приводит к потере топливной экономичности, снижению показателей надежности и к загрязнению окружающей среды [1, 2, 3].

Нестабильная от цикла к циклу работа ТА приводит к появлению на коленчатом валу периодических колебаний крутящего момента, что вызывает неравномерность частоты вращения с большими амплитудами при работе дизеля на режимах холостого хода и минимальных оборотов двигателя под нагрузкой. При этом не удастся дальнейшее снижение частоты вращения для



обеспечения даже требований действующего стандарта.

Применение в эксплуатационной практике водотопливной эмульсии (ВТЭ) эффективно из-за увеличения активного хода плунжера пропорционального водосодержанию эмульсии [1, 4], что уменьшает межцикловую неравномерность цикловых подач ТА и позволяет устранять выше приведенные недостатки в работе ТА и двигателя.

Для снижения изнашивания топливной аппаратуры дизелей при сжигании ВТЭ она должна подвергаться центрифугированию. Эффективность удаления из эмульсии опасных для трибосопряжений топливной системы механических примесей может рассчитываться по методике [5, 6].

Режимы обслуживания топливных саморегенерирующихся фильтров задаются по рекомендациям, изложенным в [7], при корректном задании адгезии топливных отложений срок автономной работы фильтра при очистке ВТЭ может рассчитываться по выражениям, приведенным в [8].

В статье выполнен сопоставительный анализ расчетов процессов топливоподачи судового дизеля 6ЧСН2А18/22 (ДРА-300) при работе по винтовой характеристике на дизельном топливе (ДТ) и водотопливной эмульсии с водосодержанием 30% как на верхнем диапазоне мощности, так и на режимах минимальных устойчивых оборотов под нагрузкой и холостом ходу.

#### Анализ влияния ВТЭ на возможность расширения рабочего диапазона ТА в области номинальных режимов работы

На рис. 1 и рис. 2 представлен рабочий процесс ТА при работе на дизельном топливе (ДТ) и на водотопливной эмульсии (ВТЭ) на номинальном режиме. Здесь и далее в тексте:  $f_o$  и  $f_{отс}$  – площадь открытия наполнительных и отсечных окон плунжера, соответственно;  $P_f$  и  $P_n$  – давления топлива в распылителе и штуцере насоса высокого давления, соответственно;  $z$  и  $y$  – подъем иглы распылителя и нагнетательного клапана, соответственно.

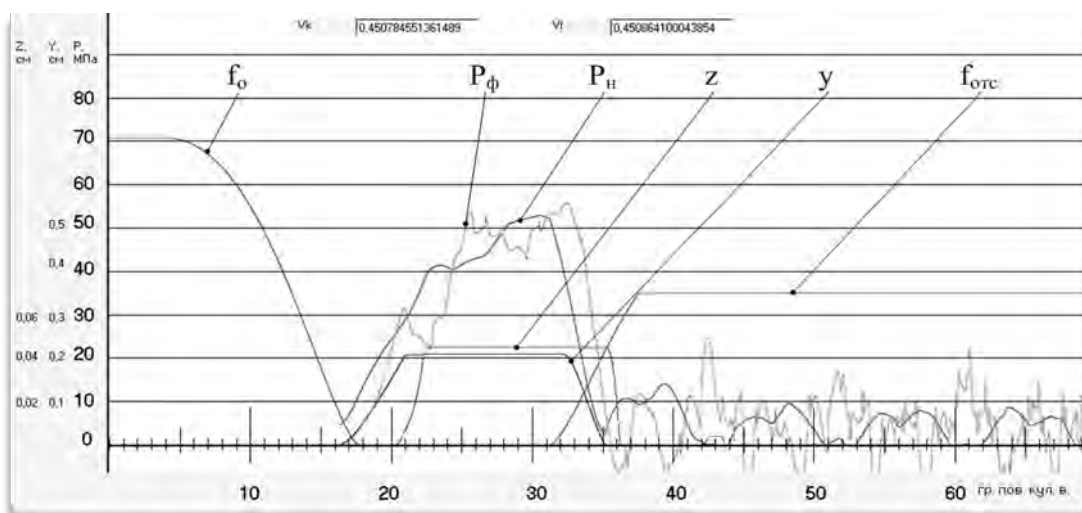


Рис. 1. Рабочие процессы топливоподачи на режиме 100% нагрузки при работе по винтовой характеристике (ДТ)

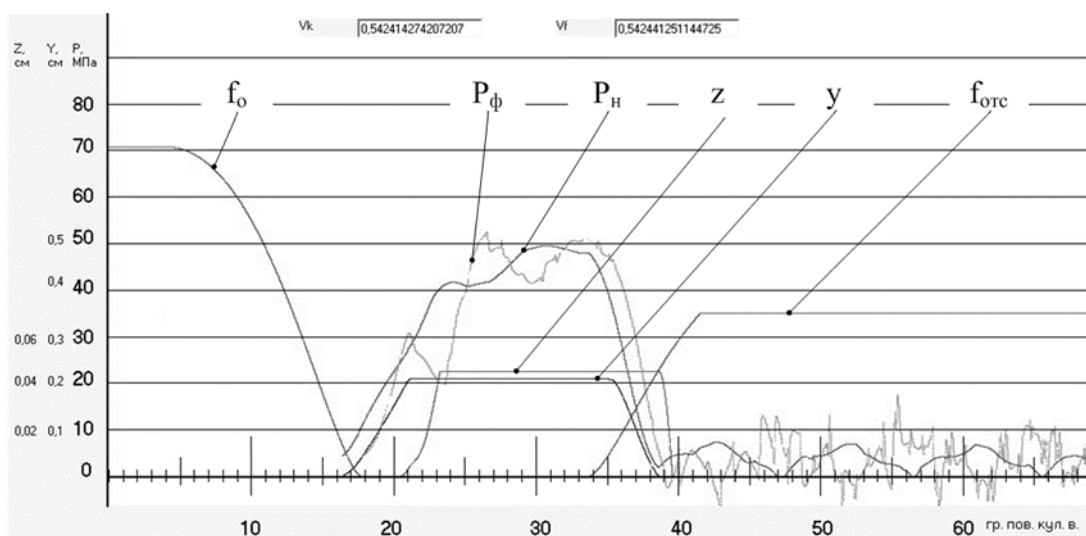


Рис. 2. Рабочие процессы топливоподачи на режиме 100% нагрузки при работе по винтовой характеристике (ВТЭ)

1. Отметим существенное улучшение процессов топливоподачи и работы самого дизеля (рис. 1 и рис. 2). Так, доля повторного впрыскивания при использовании ВТЭ снижается на номинальном режиме с 3,66% при работе на дизельном топливе до нуля, (для режимов, меньших 75% при работе на ВТЭ повторные впрыскивания также исчезают).

При работе на ДТ повторное впрыскивание происходит при угле поворота кулачкового вала 42-44 при достаточно больших колебаниях давления в нагнетательном трубопроводе высокого давления (ТВД).

Безусловно, ВТЭ обеспечивает на полных нагрузках более высокую топливную экономичность, снижение нагарообразования деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) и, следовательно, уменьшает износы ЦПГ, повышает работоспособность и долговечность основных элементов двигателя, что положительно сказывается и на экологических характеристиках (выбросы оксидов азота) двигателя [9, 10].

2. При работе на ВТЭ (рис. 2) улучшаются параметры впрыскивания, подтверждающие вышеизложенное. Так, при примерном равенстве количества топлива, поданного за период посадки иглы продолжительность впрыскивания для режимов нагрузки 100% и 75% увеличилась с 15,7 и 13,34 град.п.кул.в. до 18,8 и 15,9 град.п.кул.в. соответственно. Этот перенос сгорания обеспечивает более мягкий рабочий процесс при снижении максимального давления газов в цилиндре. Следует отметить увеличение значения среднего интегрального давления  $P_{инт}$  на номинальном режиме с 39 МПа до 53,2 МПа при работе на ВТЭ, что подтверждает существенное улучшение качества смесеобразования в цилиндре и возможное повышение топливной экономичности дизеля. При дальнейшем снижении нагрузки этот эффект начинает уменьшаться. Стабильность последовательных циклов при работе на дизельном топливе и ВТЭ (критерий  $X$ ) практически высокая и не

сказывается на величине степени неравномерности вращения коленчатого вала (см. табл.).

### Анализ влияния ВТЭ на возможность расширения рабочего диапазона ТА в области минимальных режимов работы

С целью расширения диапазона стабильных подач при работе на минимальных частотах вращения необходимо учитывать значение критерия стабильности последовательных впрыскиваний  $X$  [1]. При условии  $1,6 < X < 2$  последовательные впрыскивания характеризуются значительной межцикловой нестабильностью, при которой трудно и даже невозможно реализовать минимально возможный устойчивый режим работы дизеля и, следовательно, не удастся выполнить требования ГОСТ 10150-88 по достижению минимальных устойчивых оборотов холостого хода с целью дальнейшего расширения рабочего диапазона стабильных цикловых подач и соответствующему выходу дизеля на минимально возможные обороты под нагрузкой.

1. На рис. 3 и 4 представлены рабочие процессы топливоподачи на режиме минимальных устойчивых оборотов под нагрузкой при работе по винтовой характеристике на ДТ и ВТЭ. Происходит снижение остаточного давления в системе вплоть до разрывов сплошности в ТВД с присоединенными объемами в штуцере ТНВД и распылителя, что характерно для классической ТА.

Соответственно снижаются величины давлений в штуцере ТНВД и форсунки, а также среднего интегрального давления в распылителе, что приводит к ухудшению смесеобразования и снижению топливной экономичности как для работы на дизельном топливе, так и на ВТЭ.

2. К вопросу устойчивости последовательных циклов впрыскивания: так, при выходе на режим минимально устойчивых оборотов под нагрузкой при работе на дизельном топливе критерий стабильности  $X=1,77$ , при работе на ВТЭ критерий стабильности приближается к предельному значению  $X < 2$ .

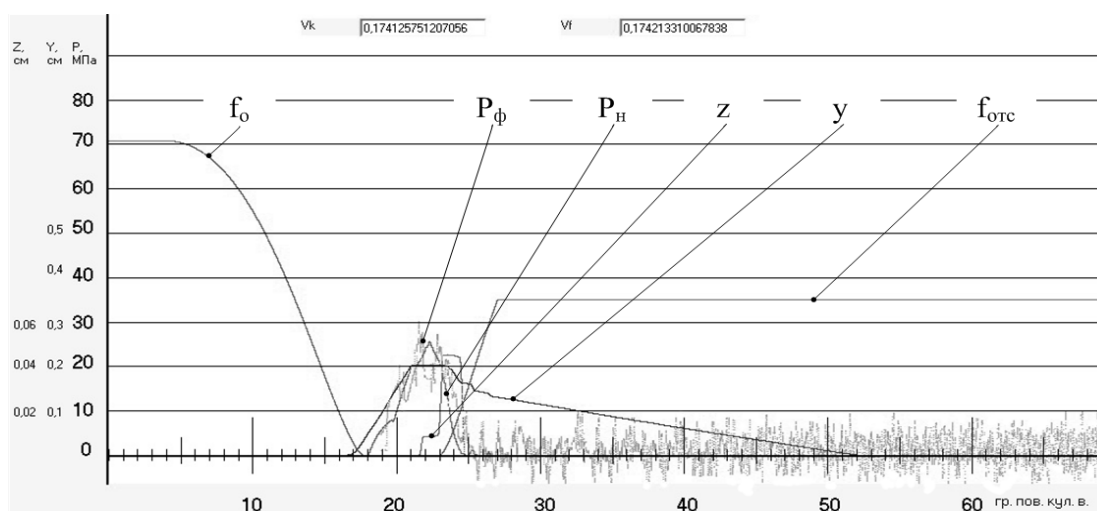


Рис. 3. Рабочие процессы топливоподачи на режиме минимальных устойчивых оборотов под нагрузкой при работе по винтовой характеристике (ДТ)

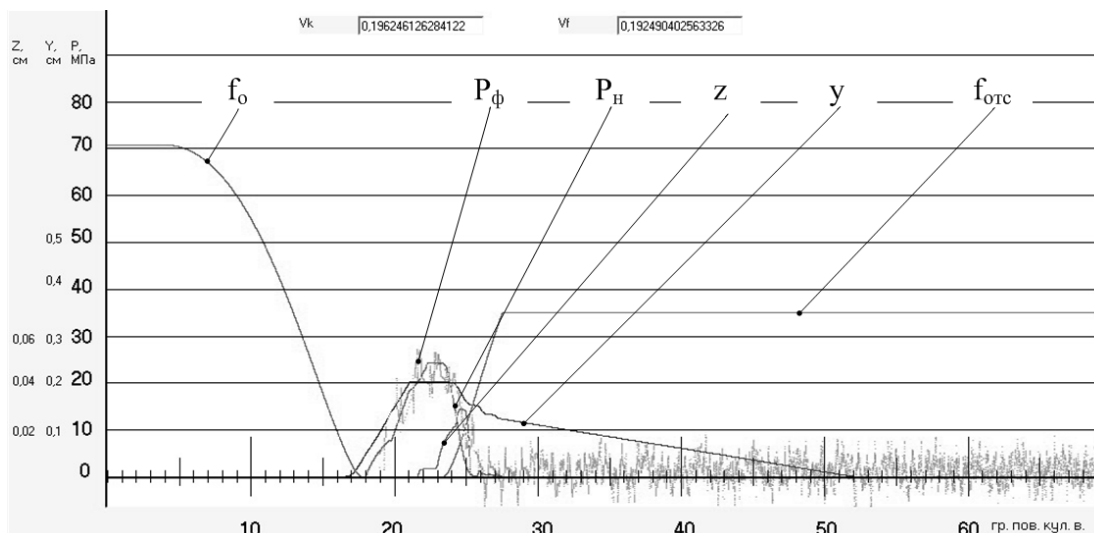


Рис. 4. Рабочие процессы топливоподачи на режиме минимальных устойчивых оборотов под нагрузкой при работе по винтовой характеристике (ВТЭ)

В обоих случаях имеют место периодические незатухающие колебания последовательных циклов топливоподачи и наблюдается неустойчивая работа дизеля. В табл. приведены графы для 10-го, 11-го и 12-го циклов впрыскивания, что позволяет анализировать процессы топливоподачи после их стабилизации. И именно по ним определяются

значения критерия стабильности X в последовательных циклах впрыскивания. Остаточное давление в десятом, одиннадцатом и двенадцатом циклах впрыскивания колеблется с амплитудой для дизельного топлива -9,42, -9,54, -9,55, для ВТЭ -7,29, -6,84, -7,41 (см. табл.). Эти режимы реально обеспечиваются на дизеле.

Таблица

**Последовательные циклы впрыскивания**

Нагрузка	№ цикла	V <sub>к</sub> , см <sup>3</sup>		V <sub>г</sub> , см <sup>3</sup>		P <sub>отс</sub> , МПа		Критерий стабильности X	
		ДТ	ВТЭ	ДТ	ВТЭ	ДТ	ВТЭ	ДТ	ВТЭ
100%	10	0,4506	0,5424	0,4507	0,5422	4,53	4,24	0,481	0,407
	11	0,4509	0,5424	0,4507	0,5423	4,52	4,26		
	12	0,4509	0,5424	0,4509	0,5424	4,56	4,28		
75%	10	0,3954	0,4718	0,3933	0,4718	3,47	1,91	0,778	1,111
	11	0,3945	0,4702	0,3951	0,4718	3,42	1,91		
	12	0,3966	0,4706	0,3951	0,4708	3,33	1,69		
50%	10	0,3057	0,3686	0,3048	0,3696	-5,06	-3,48	0,148	0,296
	11	0,3044	0,3687	0,3050	0,3692	-4,92	-3,58		
	12	0,3057	0,3682	0,3047	0,3690	-5,13	-3,65		
25%	10	0,2020	0,2521	0,2040	0,2566	-13,4	-5,10	1,410	1,222
	11	0,2030	0,2593	0,2040	0,2555	-13,8	-5,69		
	12	0,2030	0,2534	0,2037	0,2567	-14,0	-5,19		
Минимальные устойчивые обороты под нагрузкой согласно ГОСТ 10150-88 (225 мин <sup>-1</sup> )	10	0,1700	0,1959	0,1711	0,1926	-9,42	-7,29	1,77	1,9-2
	11	0,1710	0,2086	0,17	0,2071	-9,54	-6,84		
	12	0,1741	0,1962	0,173	0,1925	-9,55	-7,41		
Предполагаемый режим снижения минимальных устойчивых оборотов под нагрузкой (200 мин <sup>-1</sup> )	10	0,1324	0,1529	0,1359	0,1548	-7,45	-4,98	1,040	1,11
	11	0,1311	0,1536	0,1297	0,1527	-8,02	-5,23		
	12	0,1262	0,1536	0,1243	0,1533	-7,79	-5,10		
Мин. устойчивые обороты холостого хода согласно ГОСТ 10150-88 (300 мин <sup>-1</sup> )	10	0,0299	0,0536	0,0441	0,0542	-5,47	-4,57	1,963	0,407
	11	0,0391	0,0536	0,0297	0,0532	-7,73	-4,65		
	12	0,0429	0,0541	0,0403	0,0544	-6,24	-4,59		
Предполагаемые мин. устойчивые обороты холостого хода (250 мин <sup>-1</sup> )	10	0,0225	0,0380	0,0307	0,0368	-6,30	0,28	1,9-2	0,630
	11	0,0361	0,0372	0,0283	0,0378	-7,61	0,45		
	12	0,0222	0,0377	0,0307	0,0374	-6,36	0,36		

При этом объемная подача в этих последовательных циклах составляет величину соответственно для дизельного топлива 0,171 см<sup>3</sup>/цикл, 0,17 см<sup>3</sup>/цикл, 0,173 см<sup>3</sup>/цикл (для работы на ВТЭ соответственно 0,192, 0,192, 0,192). При этом будет иметь место повышенная нестабильность частоты вращения. Поэтому в эксплуатации это и есть реально достижимый минимально устойчивый режим под нагрузкой. Применение ВТЭ обеспечивает примерно аналогичные колебания подачи в последовательных циклах, но при этом расходная характеристика через форсунку при работе на ВТЭ является более пологой. Это снижает влияние колебаний цикловой подачи на неравномерность крутящего момента и, соответственно, на степень нестабильности частоты вращения. Таким образом, работа ТА на ВТЭ обеспечивает надежное достижение минимальной частоты вращения под нагрузкой и появляется возможность дальнейшего снижения устойчивых оборотов.

3. При выходе на режим минимальных устойчивых оборотов холостого хода при работе на дизельном топливе  $X=1,96$ , что вызывает высокую

неравномерность вращения и затрудняет достижение этого режима. При работе на ВТЭ критерий стабильности приближается к значению 0,407 (см. табл.), это стабильная работа и режим минимальных оборотов холостого хода реально обеспечивается и появляется возможность дальнейшего снижения устойчивых оборотов холостого хода. Здесь амплитуда колебаний остаточного давления в последовательных циклах (10, 11, 12) соответственно при работе на дизельном топливе и ВТЭ составляет -5,47, -7,73, -6,24 МПа и соответственно -4,57, -4,65, -4,59 МПа. Это обстоятельство подтверждается полученными расчетом значениями критерия стабильности  $X$ . Таким образом, применение ВТЭ обеспечивает с запасом требования действующего ГОСТ 10150-88 и позволяет решать вопрос дальнейшего расширения диапазона устойчивых подач топлива в последовательных циклах на режиме холостого хода.

4. Реально становится возможным обеспечить так называемый предполагаемый (реально достижимый) режим минимальных устойчивых оборотов холостого хода 250 мин<sup>-1</sup> вместо 300 мин<sup>-1</sup> (рис. 5).

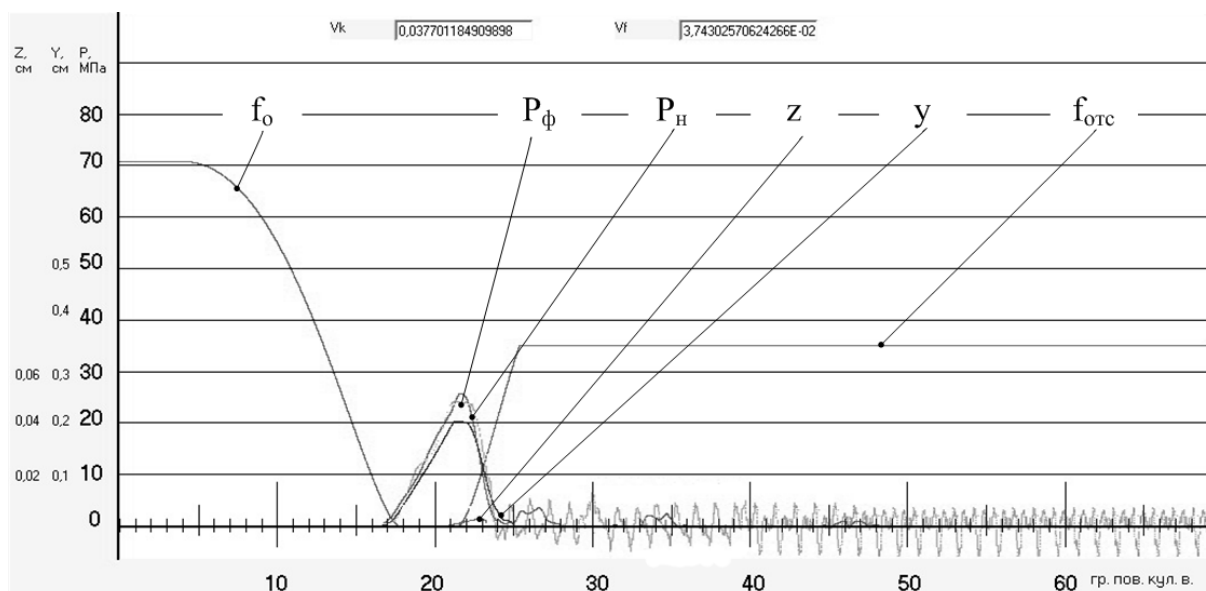


Рис. 5. Предполагаемый (реально достижимый) режим минимальных устойчивых оборотов холостого хода при работе на ВТЭ 250 мин<sup>-1</sup> вместо 300 мин<sup>-1</sup>

При этом предполагаемый с целью дальнейшего расширения рабочего диапазона дизеля режим минимальных оборотов под нагрузкой может быть реализован при 200 мин<sup>-1</sup> вместо 225 мин<sup>-1</sup> (рис. 6) В этом случае практически не потребуются в реальный автоматический регулятор частоты вносить конструктивные изменения и настройки, так как степень неравномерности у существующего регулятора примерно обеспечивает переход с оборотов 200 мин<sup>-1</sup> режима минимально устойчивой работы под нагрузкой на минимально устойчивые обороты холостого хода 250 мин<sup>-1</sup>.

При этом цикловая подача и расход топлива уменьшаются для режима со снижением минимально устойчивых оборотов под нагрузкой с 225 об/мин до предполагаемых 200 об/мин (достижимых при работе на ВТЭ) на 24-25%. Суда рыбопромыслового флота длительное время работают на трал, поэтому экономия топлива будет достаточно велика, при этом существенно повышается эффективность процесса траления рыбы. Суда портового буксирного флота до 75% времени эксплуатации работают на режиме холостого хода. При этом топливная экономичность может улучшиться на 30-32 % при одновременном повышении ресурса работки.



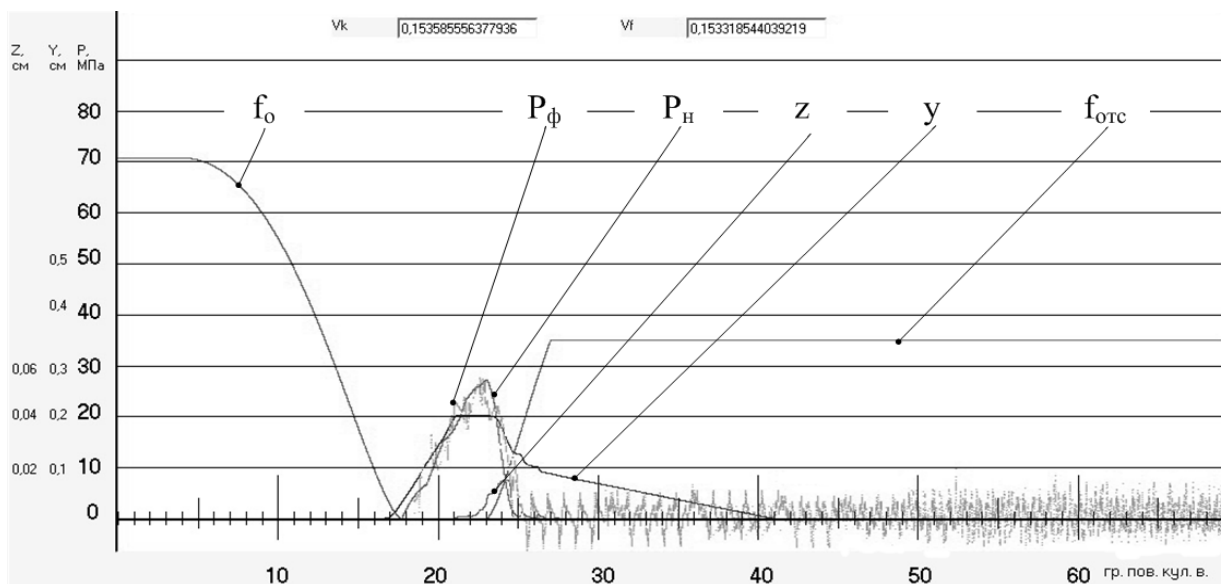


Рис. 6. Предполагаемый (реально достижимый) режим минимальных устойчивых оборотов под нагрузкой при работе на ВТЭ 200 мин<sup>-1</sup> вместо 225 мин<sup>-1</sup>

На рис. 7 и 8 для сравнения представлены процессы топливоподачи в последовательных циклах впрыскивания (10, 11 и 12), полученных простым наложением диаграмм для режимов 25 % при работе на дизельном топливе (при значении критерия стабильности  $X=1,41$ ) и водотопливной эмульсии ( $X=1,22$ ). При этом межцикловая нестабильность хорошо визуализируется, что позволяет качественно оценить протекание процессов топливоподачи в последовательных впрыскиваниях. Оценка по критерию стабильности  $X$

хорошо иллюстрируется данными рисунками. Безусловно, давления впрыскивания, в том числе  $P_{инт}$ , свидетельствуют в пользу использования ВТЭ (см. табл.). Имеет место более активное впрыскивание (по давлению до 9%) при несколько большей продолжительности впрыскивания.

Межцикловая нестабильность при работе близ установившегося режима прослеживается в виде небольшого разброса параметров впрыскивания, причем разброс при работе на дизельном топливе больший ( $X_{дт} > X_{втэ}$ ).

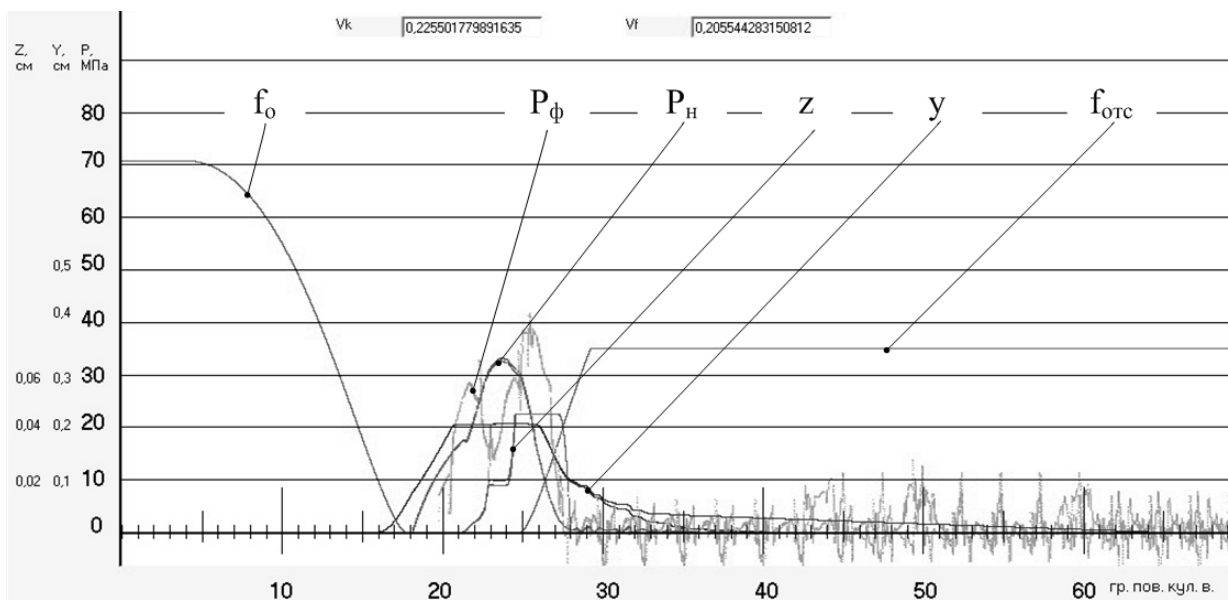


Рис. 7. Наложенные процессы топливоподачи в 10, 11, 12 циклах при работе на дизельном топливе на режиме 25 % нагрузке по винтовой характеристике при  $X=1,41$

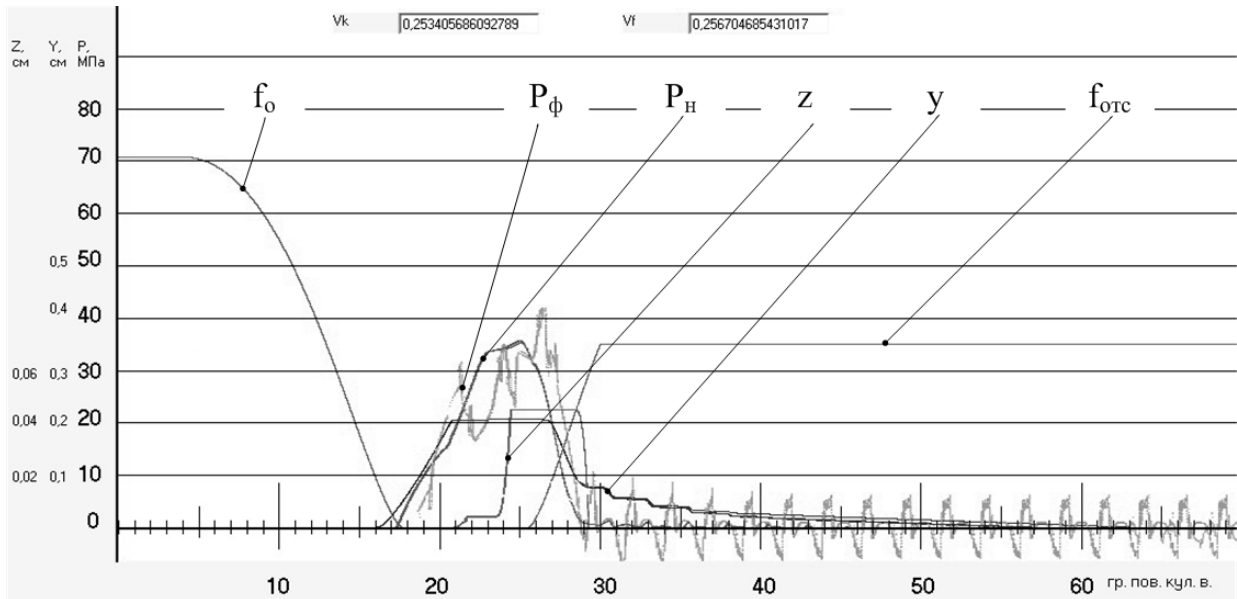


Рис. 8. Наложённые процессы топливоподачи в 10, 11, 12 циклах впрыскивания при работе на ВТЭ на режиме 25 % нагрузке по винтовой характеристике при  $X=1,22$

Для более детального представления о межцикловой нестабильности ниже приводятся диаграммы процессов топливоподачи при работе ТА на дизельном топливе и ВТЭ в увеличенном виде с наложением 10, 11 и 12 циклов. Это позволяет провести сопоставительный анализ процессов топливоподачи (рис. 9 и рис. 10).

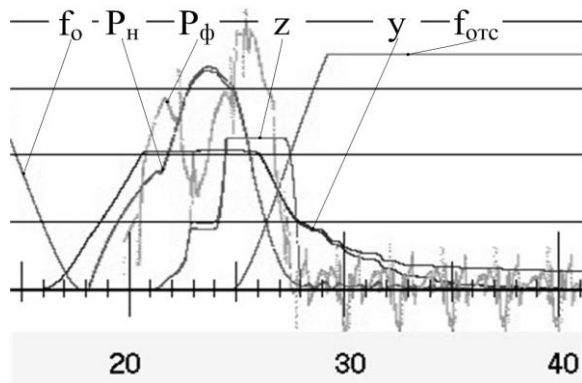


Рис. 9. Процессы топливоподачи на режиме 25% при работе по винтовой характеристике на дизельном топливе в 10, 11, 12 циклах с наложением их друг на друга

Отметим, что при разбросе параметров впрыскивания в заключительной фазе движения иглы распылителя стабильно и, следовательно, колебаний цикловой подачи и продолжительности впрыскивания в последовательных циклах не отмечается (см. табл.). Так, при  $X=1,41$  для работы на ДТ объемная подача топлива в 10, 11, 12 циклах практически не меняется и составляет величину  $0,204 \text{ см}^3/\text{цикл}$ . Этот режим работы очень важен при работе судового дизеля на трал [3, 4].

Продолжительность впрыскивания при работе ТА на ВТЭ (рис. 10) увеличилась с 6,47 град.п.кул.в. до 8,07 при росте среднего интегрального давления

с 23,8 МПа до 24,3 МПа и максимального давления впрыскивания с 41 до 45 МПа.

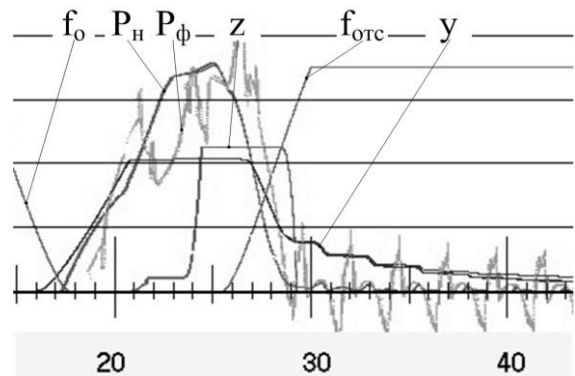


Рис. 10. Процессы топливоподачи на режиме 25% при работе на ВТЭ по винтовой характеристике в 10, 11, 12 циклах с наложением их друг на друга

Следует отметить повышение межцикловой нестабильности и снижение скорости посадки иглы распылителя. Разброс параметров впрыскивания после посадки иглы существенно уменьшился. Процессы впрыскивания при работе на ВТЭ улучшаются [9].

Действительно, при работе на ДТ практически невозможно обеспечить снижение скоростного режима до  $250 \text{ мин}^{-1}$  холостого хода (см. рис. 11) согласно требованию действующего ГОСТ 10150-88. Как видно из рис.9 имеет место высокая нестабильность процессов топливоподачи в последовательных циклах  $X=1,9-2$ . Безусловно, это вызовет значительную неравномерность вращения коленчатого вала и не позволит обеспечить качественную работу дизеля. При такой нестабильности вращения возможна и остановка дизеля. Именно поэтому в эксплуатации вынужденно работают при более высокой частоте вращения – 300

мин<sup>-1</sup> и тем самым снижая моторесурс дизеля и его топливную экономичность. Как видно из табл. расход топлива через форсунку в последовательных циклах колеблется в пределах 0, 0307 - 0,0283 - 0, 0307 см<sup>3</sup>/цикл.

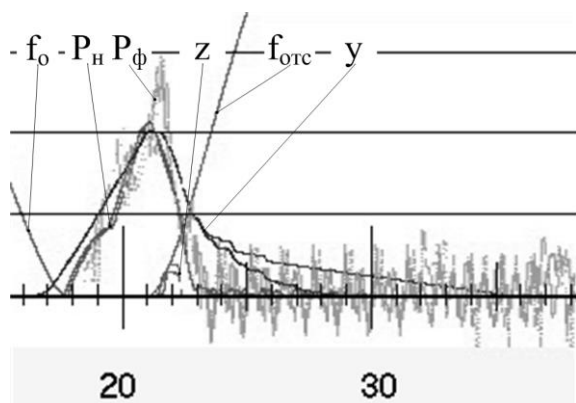


Рис. 11. Процессы топливоподачи на режиме холостого хода при работе по винтовой характеристике на дизельном топливе в 10, 11, 12 циклах с наложением их друг на друга (при 250 мин<sup>-1</sup> вместо 300 мин<sup>-1</sup> в соответствии с ГОСТ 10150-88)

Обеспечить устойчивые обороты при работе на дизельном топливе без нагрузки практически невозможно [10]. Имеет большой разброс параметров топливоподачи. Подъем иглы распылителя становится нерегулярным.

Как видно из рис. 12 при работе на ВТЭ на режиме холостого хода вполне возможно обеспечить достижение частоты вращения коленчатого вала 250 мин<sup>-1</sup>. Следует отметить очевидную стабилизацию последовательных циклов впрыскивания ( $X=0,63$ , см. табл. и рис. 12) при использовании водотопливной эмульсии. И несмотря на небольшое уменьшение максимального давления впрыскивания (что для подобных режимов несущественно), достигается возможность расширения диапазона рабочих режимов дизеля. При этом при использовании ВТЭ (см. табл.) в качестве альтернативного топлива решается вопрос снижения минимальных устойчивых оборотов при работе под нагрузкой по винтовой характеристике дизеля.

Использование ВТЭ в судовых дизелях положительно сказывается на функционировании не только топливной, но и смазочной систем двигателя

[11]. При этом грязевая нагрузка на агрегаты маслоочистки падает.

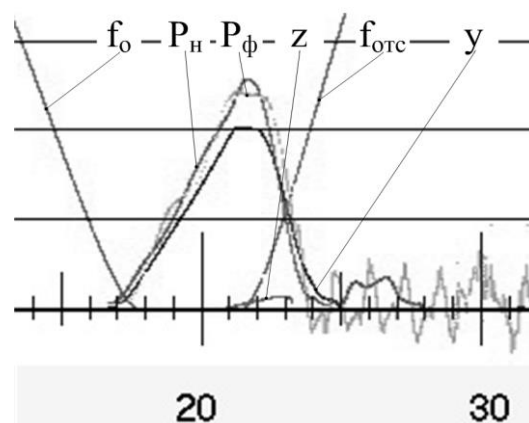


Рис. 12. Процессы топливоподачи на режиме холостого хода при работе по винтовой характеристике на ВТЭ в 10, 11, 12 циклах с наложением их друг на друга (при 250 мин<sup>-1</sup> вместо 300 мин<sup>-1</sup> в соответствии с ГОСТ 10150-88)

Скорость изнашивания подшипников и деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) остается на уровне использования дистиллятных (дизельных) топлив [12]. Имитационное моделирование при сжигании ВТЭ показало увеличение работоспособности большинства трибосопряжений двигателей из-за снижения нагарообразования в ЦПГ и повышения дисперсности механических примесей, циркулирующих в топливной и смазочной системах тронковых дизелей.

### Заключение

Использование водотопливной эмульсии улучшает качество работы дизеля и, главное, устойчивость на малых режимах работы. Уменьшение скорости посадки иглы распылителя с 57,5 см/с до 3,73 см/с способствует повышению работоспособности форсунки, а снижение межцикловой нестабильности существенно повышает качество работы дизеля в эксплуатации.

Таким образом, реально возможно расширение диапазона стабильных подач топливной аппаратуры путем применения ВТЭ как за счет снижения скоростных режимов малых подач топлива, так и обеспечения форсированных подач топлива вследствие отсутствия повторных впрыскиваний.

### Литература

1. Горелик Г. Б. «Перетекание» электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов и обеспечение качества режимов малых нагрузок: монография. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – 250 с.
2. Соболенко А. Н., Воробьев Б. Н. Проблемы внедрения газомоторного топлива в судовых дизелях // Научные труды Дальрыбвтуза. – №1 (т. 44). – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2018 г. – С. 73-77.
3. Кича Г. П. Экономичная эксплуатация дизелей // Морской флот. – 1984. – №11. – С. 47-49.
4. Чистяков А. Ю., Горелик Г. Б., Мозолев О. Н. Особенности процессов топливоподачи в дизелях при использовании водотопливной эмульсии в качестве альтернативного топлива // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – №4(46). – Т. 1. – С. 111-116.
5. Кича Г. П., Надежкин А. В., Семенюк Л. А. Новые стохастические модели очистки топлив и масел судовыми центробежными аппаратами со сложной гидродинамической обстановкой // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – Т.5. – №4(42). – С. 77-89.
6. Воробьев Б. Н., Надежкин А. В., Кича Г. П. Стохастическое моделирование разделения сложных гетерогенных систем судовых устройств на основе представлений и аппарата случайных марковских процессов // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – Т.2. – №3(37). – С. 112-120.

7. Kicha G. P. Oil cleaning in internal combustion engines // Chemistry and technology of fuels and oils. – 1985. – Vol.21. – №1-2. – P. 87-90.
8. Кича Г. П., Надежкин А. В., Бойко С. П. Расчет параметров регенерации самоочищающихся фильтров смазочных систем судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – Т.2. – №1(47). – С. 129-130.
9. Горелик Г. Б., Коньков А. Ю., Кончаков Е. И. Возможности и перспективы применения водотопливных эмульсий в судовых дизелях в качестве альтернативного топлива // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – №3(37). – Т.2. – С. 97-102.
10. Кича Г. П., Надежкин А. В., Безвербный А. В. Имитационная модель трибодиагностики двигателей внутреннего сгорания // Трение и смазка в машинах и механизмах. – М. : Машиностроение, – 2009. – №3. – С. 6-14.
11. Кича Г. П. Влияние очистки масел на их расход в дизельных двигателях // Химия и технология топлив и масел. – 1986. – №8. – С. 22-24.
12. Кича Г. П., Надежкин А. В., Перминов Б. Н. Имитационное моделирование смазки трибосопряжений и изнашивание основных деталей ДВС // Транспортное дело России. – 2004. – №2. – С. 51-53.

#### References

1. Gorelik G. B. «Peretekanie» elektricheskoy moshchnosti pri parallel'noy rabote dizel'-generatorov i obespechenie kachestva rezhimov malyykh nagruzok, monografiya [Electric power flow between working in parallel diesel generators and quality assurance of small loads]. Khabarovsk, PNU Publ., 2016. 250 p.
2. Sobolenko A. N., Vorob'ev B. N. (2018). Problemy vnedreniya gazomotornogo topliva v sudovykh dizelyakh [Problems of gas fuel usage in ship engines]. Nauchnye trudy Dal'rybvvtuza, 1(44), 73-77.
3. Kicha G. P. (1984). Ekonomichnaya ekspluatatsiya dizeley [Economical usage of diesel engines]. Morskoy flot, №11, 47-49.
4. Chistyakov A. Yu., Gorelik G. B., Mozolev O. N. (2019). Osobennosti protsessov toplivopodachi v dizelyakh pri ispol'zovanii vodotoplivnoy emul'sii v kachestve al'ternativnogo topliva [Features of fuel supply processes in diesels hen using water-fuel emulsion as an alternative fuel] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 4(46), 111-116.
5. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Semenyuk L. A. (2018). Novye stokhasticheskie modeli ochistki topliv i masel sudovymi tsentrobezhnymi apparatami so slozhnoy gidrodinamicheskoy obstanovkoy [New stochastic models for cleaning fuels and oils by marine centrifugal apparatus with a complex hydrodynamic situation] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 4(42), 77-89.
6. Vorob'ev B. N., Nadezhkin A. V., Kicha G. P. (2017). Stokhasticheskoe modelirovanie razdeleniya slozhnykh geterogennykh sistem sudovykh ustroystv na osnove predstavleniy i apparata sluchaynykh markovskikh protsessov [Stochastic separation modeling heterogeneous systems of ship devices on the basis of the concepts and apparatus of random markov processes] // morskie intellektual'nye tekhnologii, 3(37), 112-120.
7. Kicha G. P. Oil cleaning in internal combustion engines. Chemistry and technology of fuels and oils. 1985, Vol.21. №1-2. P. 87-90.
8. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Boyko S. P. (2020). Raschet parametrov regeneratsii samoochishchayushchikhsya fil'trov smazochnykh sistem sudovykh dizeley [The calculation regeneration parameters of self-cleaning filters for lubricant systems of ship diesels] // morskie intellektual'nye tekhnologii, 1(47), 129-130.
9. Gorelik G. B., Kon'kov A. Yu., Konchakov E. I. (2017). Vozmozhnosti i perspektivy primeneniya vodotoplivnykh emul'siy v sudovykh dizelyakh v kachestve al'ternativnogo topliva [The opportunities and the perspectives using of water-fuel emulsions for marine diesels as alternative fuel] // morskie intellektual'nye tekhnologii, 3(37), 97-102.
10. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Bezverbnyy A. V. (2009). Imitatsionnaya model' tribodiagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya [Simulation model of internal combustion engines tribodiagnostics]. Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizмах, №3, 6-14.
11. Kicha G. P. (1986). Vliyanie ochistki masel na ikh rashkod v dizel'nykh dvigatelyakh [Influence of oil cleaning on oil consumption in diesel engines], Khimiya i tekhnologiya topliv i masel, №8, 22-24.
12. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Perminov B. N. (2004). Imitatsionnoe modelirovanie smazki tribosopryazheniy i iznashivanie osnovnykh detaley DVS [Simulation of tribo-couplings lubrication and wear of the main parts of the ICE]. Transportnoe delo Rossii, №2, 51-53.

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

**Александр Юрьевич Чистяков**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, систем и оборудования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: glucker2000@mail.ru

**Alexandr Yu. Chistyakov**, candidate of engineering sciences, docent, associate Professor, Department of Ship Power Plants, Systems and Equipment, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: glucker2000@mail.ru



**Геннадий Бенцианович Горелик**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания, Тихоокеанский государственный университет, 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, e-mail: ggorelik@mail.ru

**Олег Николаевич Мозолев**, старший преподаватель кафедры двигателей внутреннего сгорания, Тихоокеанский государственный университет, 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, e-mail: oleg19793@yandex.ru

**Gennadiy B. Gorelik**, doctor of engineering sciences, professor, professor of department of Internal combustion engines, Pacific National University, Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680035, Russian Federation, e-mail: ggorelik@mail.ru

**Oleg N. Mozolev**, Senior Lecturer of department of Internal combustion engines, Pacific National University, Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680035, Russian, Federation, e-mail: oleg19793@yandex.ru

Поступила в редакцию: 14.12.2020

Принята к публикации: 12.02.2021

УДК 621.436:504.4.054

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.031

## Анализ выбросов загрязняющих веществ от судовых двигателей при сжигании традиционных и альтернативных видов топлив

Г.В. Черкаев<sup>1</sup> e-mail: gcherkaev@mail.ru<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы, связанные с анализом достоинств и недостатков различных видов альтернативных топлив. Эти топлива могут применяться на судах различного назначения со средне- и высокооборотными дизельными двигателями. Наиболее актуальной альтернативой для полной или частичной замены жидкого нефтяного топлива является биотопливо. Особое внимание уделено микроводорослям, темпы роста которых значительно выше, чем у выращиваемых наземных культур. Рассматриваются такие виды альтернативных топлив, как биодизель, биоэтанол, биогаз, растительное масло, пиролизное масло, биобутанол, диметиловый эфир. Показано, что для расчета количества выбросов загрязняющих веществ, выделяющихся при сжигании биотоплив в судовых ДВС, может подойти модель «черного ящика». Зная основные физико-химические свойства топлива (теплотворная способность, плотность, вязкость, содержание кислорода и др.), можно оценить расход топлива, определить выбросы углекислого газа. Представлены результаты расчетов выбросов загрязняющих веществ при сжигании биотоплив. В итоге все полученные результаты могут быть переведены в условные единицы и пересчитаны в эквиваленты выбрасываемых парниковых газов.

**Ключевые слова:** судовой двигатель, выбросы в атмосферу, загрязнение окружающей среды, биотопливо, водоросли, диоксид углерода.

## Analysis of pollutant emissions from marine engines when burning traditional and alternative fuels

Georgii V. Cherkaev<sup>1</sup> e-mail: gcherkaev@mail.ru<sup>1</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** The article discusses issues related to the analysis of the advantages and disadvantages of various types of alternative fuels. These fuels can be used on ships for various purposes equipped with MSD and HSD engines. Biofuels are the most relevant alternative for the complete or partial replacement of liquid fuel oil. Particular attention is paid to microalgae, the growth rate of which is much higher than that of grown terrestrial crops. These types of alternative fuels are considered as biodiesel, bioethanol, biogas, vegetable oil, pyrolysis oil, biobutanol, dimethyl ether, etc. It is shown that the "black box" model may be suitable for calculating the amount of pollutant emissions released during the combustion of biofuels in ship internal combustion engines. Knowing the basic physicochemical properties of fuel (calorific value, density, viscosity, oxygen content, etc.), it is possible to estimate fuel consumption and determine CO<sub>2</sub> emissions. The calculation results of pollutant emissions from biofuel combustion are presented. As a result, all the results obtained can be converted into conventional units and recalculated into the equivalents of the emitted greenhouse gases.

**Key words:** marine engine, air emissions, environmental pollution, biofuels, algae, carbon dioxide.

В настоящее время морской транспорт является важной составляющей мировой транспортной системы и служит основой мировой торговли и спасательным кругом для большинства прибрежных стран, особенно островных, перевозя до 90% тоннажа всех продаваемых товаров. По сведениям Конференции Организации Объединенных Наций по торговле и развитию, на протяжении последних 50 лет мировые морские грузоперевозки, ежегодно увеличиваясь, достигли величины 10 млрд тонн. Несомненно, что из-за постоянно меняющейся структуры мирового производства, связанной с глобализацией, в обозримом будущем морские суда продолжат играть ведущую роль в этой системе.

Энергетические источники, необходимые для обеспечения движения судов за последние 150 лет претерпели значительные изменения, начиная с применения энергии ветра для парусных судов и заканчивая судовым дизельным топливом (ДТ), которое в настоящее время является основным для этого экономического сектора. Потребление жидкого топлива растет год от года в соответствии с растущим спросом на морские перевозки. По оценкам Международной морской организации

(ИМО), в среднем мировой морской флот потребляет до 325 млн тонн топлива ежегодно, выбрасывая в атмосферу загрязняющие вещества (ЗВ), объем которых, по разным оценкам, пока составляет от 2,8% до 5% годовых глобальных выбросов парниковых газов (в пересчете на выбросы углекислого газа (CO<sub>2</sub>)). Тем не менее, эти выбросы являются самыми низкими по сравнению с другими видами транспорта [1].

При все увеличивающемся спросе на морские грузоперевозки, считается, что количество выбросов ЗВ будет постепенно возрастать прямо пропорционально спросу и, если этот рост не остановить, может утроиться к середине текущего века, что приведет к более негативным последствиям, связанным с загрязнением окружающей среды (ОС) и изменением климата. В связи с этим, выбросы от двигателей морского транспорта должны быть ограничены. Эта концепция нашла свое отражение в Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ), которая предусматривает выполнение обязательных технических и эксплуатационных мер, направленных на более эффективное использование энергии на море и, одновременно, на снижение выбросов.

Главная цель – сокращение выбросов углекислого газа на 50% к 2050 году. Поэтому судовладельцам, для достижения поставленной цели, необходимо рассмотреть варианты использования более экологически безопасного топлива и возобновляемых источников энергии. Помимо этого, рост цен на жидкое топливо на фоне мирового экономического кризиса и нестабильности рынка, является еще одной веской причиной для расширения масштабов поиска современных технических решений, связанных с альтернативной энергетикой и технологиями.

Применение возобновляемых источников энергии может осуществляться на судах со всеми типами энергетических установок (ЭУ).

Перспективным сегментом флота для применения таких источников являются суда внутреннего и прибрежных районов плавания различного назначения со средне- и высокооборотными дизельными двигателями, например пассажирские и круизные суда, яхты, городской водный транспорт, катера береговой охраны, баржи, небольшие исследовательские суда речного и озерного районов плавания и т. д. [2].

Традиционно к потенциальным возобновляемым источникам энергии для судоходства можно отнести ветер (например, паруса, неподвижные крылья, роторы, обычные ветряные турбины), солнечные фотоэлектрические установки, биотопливо, энергию волн и др. Указанные экологически безопасные энергетические решения могут быть частично интегрированы либо в уже существующий флот путем модернизации, либо включены в проектирование и постройку новых судов, причем на определенном количестве новых судов могут быть применены на 100% возобновляемые источники энергии или технологии с нулевым выбросом в качестве главного двигателя.

Развитию решений в области внедрения возобновляемых источников энергии для судоходства зачастую препятствует переизбыток судов, ЭУ которых работают на традиционном топливе, отсутствие коммерческой жизнеспособности таких проектов, а также отсутствие стимулов и заинтересованности судовладельцев. Помимо этого, скорость внедрения технологий, связанных с альтернативной энергетикой, сдерживается ограниченностью инфраструктуры и другими нерыночными факторами.

Что наиболее важно – необходимо тщательно спланировать переход от традиционного ископаемого топлива к нетрадиционной энергетике на судах.

В настоящее время наиболее актуальной альтернативой для полной или частичной замены (путем смешивания с традиционным топливом) является биотопливо (БТ). Несмотря на сказанное, опыт его использования и масштабы применения для судовых двигателей остаются все еще небольшими. Все биотопливо, которое можно было бы широко использовать в этом секторе, можно разделить на следующие основные виды:

- гидрогенизированное растительное масло;
- рафинированное растительное масло;
- биодизель;
- биоэтанол;

- биобутанол;
- биометан;
- диметиловый эфир;
- пиролизное масло и др.

Также биотопливо принято классифицировать по поколениям.

Те виды биотоплива, которые производятся из наземных культур, включая сахарный тростник, кукурузу и растительное масло, называются БТ первого поколения. Зачастую эти виды биотоплива подвергаются критике за то, что они конкурируют с производством продовольствия за земельные и водные ресурсы.

К БТ второго поколения относится топливо из древесины, отходов, трав и сельскохозяйственных отходов.

БТ из водорослей считается топливом третьего поколения.

Следует отметить, что потенциал биологического сырья на нашей планете значительно превышает резервы ископаемого топлива. Так, общий объем биомассы на Земле (включающий растительный и животный мир, а также продукты его физиологической биотрансформации и промышленной переработки) оценивается в 800 млрд т при ежегодном приросте в 200 млрд т. Потенциал ископаемых энергоресурсов оценивается в меньшей степени: каменный уголь – 500 млрд т, нефть – 200 млрд т, газ – в 100 млрд т [3].

Среди всех видов биотоплив наиболее производимым продуктом является биоэтанол. Производство топливного этанола в мире составляет около 100 млн т/год и ежегодно увеличивается примерно на 5%. По оценкам специалистов стабильный рост производства топливного этанола не изменится до 30-х годов текущего столетия. Основным направлением потребления биоэтанола является использование его в качестве составляющей моторных топлив или даже – самостоятельного дизельного топлива.

Многие ученые весьма перспективным сырьем для производства БТ считают морские водоросли, так как они могут расти круглый год при благоприятных условиях даже без участия человека, а урожайность их во много раз больше, чем у наземных растений. Т.о. водорослевое биотопливо, водорослевое масло, которые используют водоросли в качестве источника богатых энергией масел является альтернативой жидкому ископаемому топливу [4].

Исследования показали, что некоторые виды водорослей при выращивании их в водорослевых прудах или фотобиореакторах, могут производить 60% и более своей сухой массы в виде масла, потому что клетки растут в виде водной суспензии, где более эффективный доступ к растворенным в воде питательным веществам.

Микроводоросли могут иметь более быстрые темпы роста, чем наземные культуры. Кроме того, они могут конвертировать гораздо более высокую долю своей биомассы в масло, чем обычные культуры, например 60% против 2–3% для сои. Выход масла из водорослей на единицу площади составляет от 58700 до 136900 дм<sup>3</sup>/га в год в зависимости от содержания липидов. Такие значения выше в 10-23 раза, чем у масличной пальмы, которая

является высокоурожайной культурой - 5 950 дм<sup>3</sup>/га в год [5].

Несмотря на то, что многие виды биотоплива рассматриваются именно как заменители традиционного жидкого топлива, их будущее все еще остается неопределенным, что связано с их основными недостатками в использовании. Так, у гидрогенизированного растительного масла, которое можно рассматривать как высококачественное топливо без смешивания со стандартным ДТ, лимитирующим фактором является его стоимость. Однако, если развитие технологий позволит снизить затраты на его изготовления, то это топливо можно будет легко смешивать с судовым газойлем.

Другой тип топлива – рафинированное растительное масло. При том, что его достоинством в ряде случаев может быть вполне конкурентоспособная цена, а также низкое содержание в выбросах отработавших газов оксидов серы и твердых частиц, однако нерешенные вопросы, связанные с биоразлагаемостью и устойчивостью к термическому окислению являются основными недостатками не только при его использовании в качестве основного топлива, но даже при смешивании с нефтяным топливом. К тому же масло из-за высокой вязкости следует перед подачей в двигатель нагревать и, в случае смешивания с нефтяным топливом, например, мазутом, существует риск кавитации в линиях подачи топлива и, как следствие, двигатель будет работать неправильно. С другой стороны, мазут эксплуатируется даже при более высоких температурах, чем масло, и полимеризация жидкого биотоплива может происходить в диапазоне повышенных температур. Как правило, разница в вязкости может привести к засорению труб и выходу из строя фильтров. В отработавших газах нет оксидов серы и сажи

Биодизель является более очищенным топливом, чем масло, но в его структуре также содержится кислород в молекулярной форме, а это означает, что существует более высокий риск нежелательной биоразлагаемости, более низкая стойкость к окислению, повышенная коррозионная активность и рост микроорганизмов в топливных резервуарах. Указанные недостатки также способствуют ограничению использования этого топлива в судовых двигателях.

Биобутанол как составная часть моторного топлива представляет существенно больший интерес, нежели биоэтанол благодаря более высокой энергетической плотности (29,2 МДж/дм<sup>3</sup> против 26,8 МДж/дм<sup>3</sup> у биоэтанола), меньшей летучести, отсутствия наркотических свойств и по ряду других эксплуатационных качеств.

Диметиловый эфир (ДМЭ) – экологически безопасное топливо без содержания серы, сырьем для производства которого служит природный газ. Теплотворная способность ДМЭ в полтора раза уступает традиционному дизельному топливу, но по остальным показателям его превосходит несомненно. В отработавших газах нет оксидов серы и сажи, и в результате сгорания ДМЭ образуется такое небольшое количество оксидов азота, что выброс без всякой очистки соответствует самым жестким в мире экологическим требованиям [6].

Некоторые новые потенциальные виды биотоплива, такие как пиролизное масло, скорее не будут иметь значимости на рынке в течение ближайшего десятилетия, поскольку уровень их технологической готовности является низким. Поэтому можно сделать вывод, что на рынке судоходного топлива преобладает традиционное нефтяное жидкое топливо, а альтернативные топлива все еще находятся на ранней стадии использования [7].

Несмотря на это особое внимание необходимо уделить не только оценке возможностей применения новых видов топлив, но и вопросам количественного состава выбросов ЗВ.

Отсутствие подобных сведений объясняется, в первую очередь, высокими эксплуатационными расходами при испытании новых видов топлив, поскольку, в отличие от автомобильного, реальный судовой двигатель требует на порядок больших объемов образцов (несколько кубических метров) для проведения одного испытания. Далее, это связано с практически полным отсутствием опытных установок, которые могли бы работать одновременно на различных видах топлив. И, наконец – с отсутствием расчетных методик.

Несомненно, что при рассмотрении вопроса о количестве выбросов ЗВ при сжигании альтернативных топлив, либо их смесей с традиционным топливом, ключевым моментом является производительность двигателя. Поэтому было бы полезно иметь модель, которая может прогнозировать расход топлива и выбросы для новой смеси на основе ее конечных физико-химических свойств.

Для таких целей, с одной стороны, вполне может подойти модель «черного ящика», которая в качестве входных параметров требует только физико-химические характеристики используемого топлива (теплотворная способность, плотность, содержание кислорода и т.д.), но не объясняет, что происходит внутри двигателя (например, не анализирует впрыск топлива). Кроме того, зная расход топлива, можно рассчитывать количество выбрасываемого углекислого газа (формула (1)):

$$Q = M_{CO_2} / \alpha \quad (1)$$

$Q$  - расход топлива,

$M_{CO_2}$  - выбросы углекислого газа, кг/кВт·ч,

$\alpha$  - коэффициент перевода выбросов CO<sub>2</sub> на кВт·ч в выбросы CO<sub>2</sub> на кг использованного топлива.

С другой стороны, в России утвержден стандарт ГОСТ Р 56163-2019 «Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу стационарными дизельными установками (новыми и после капитального ремонта) различной мощности и назначения при их эксплуатации».

Указанный стандарт предназначен для расчета максимальных разовых за 20-минутный период времени и валовых за год выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферу стационарными дизельными установками.

Расчеты выбросов выполняются для следующих ЗВ, поступающих в атмосферу с отработавшими газами стационарных дизельных установок: оксид углерода, сумма оксидов азота (NO<sub>x</sub>) (в пересчете на диоксид азота); углеводороды, углерод черный (сажа), диоксид серы, формальдегид, бенз(а)пирен.



Максимальный массовый выброс  $i$ -го вещества  $M_i$ , г/с, стационарной дизельной установкой вычисляются по формуле (2):

$$M_i = (1/3600) \cdot e_{mi} \cdot P_{Э}, \quad (2)$$

где  $e_{mi}$  – выброс  $i$ -го вредного вещества на единицу полезной работы стационарной дизельной установки в режиме эксплуатационной мощности, определяемый по таблице 1, г/кВт·ч;

$P_{Э}$  – эксплуатационная мощность дизельной установки, значение которой указано в технической документации предприятия-изготовителя. Если в технической документации не указано значение эксплуатационной мощности, то в качестве  $P_{Э}$  принимают значение номинальной мощности стационарной дизельной установки  $N_e$ , кВт:

1/3600 – коэффициент пересчета часов в секунды.

Для расчета выбросов ЗВ были выбраны несколько видов биотоплива, сжигание которых происходило в судовом ДВС мощностью 809 кВт.

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Основные результаты работы следующие:

1. Постепенное ужесточение требований к количеству выбросов ЗВ от судовых двигателей, а также по сокращению выбросов парниковых газов привело к поиску возможностей использования более экологически безопасных альтернативных топлив, изучению их свойств, достоинств и недостатков для возможности замены традиционных нефтяных топлив.

2. В настоящее время известно лишь только о нескольких попытках проведения экспериментов по сжиганию биотоплива как заменителей ДТ и мазута.

3. Остро сказывается недостаток сведений о том, какие виды топлива будут играть существенную роль для развития судоходства в ближайшие годы, особенно с учетом отсутствия четких международных правил, касающихся вопросов

внедрения возобновляемых источников энергии на судах.

4. При тестировании новых экологических топлив важно проверить их совместимость с существующей инфраструктурой. Наиболее востребованными являются виды жидких топлив, т.к. не потребуются никаких изменений при обращении с ними, их транспортировке, распределении и хранении. Говоря о характеристиках судовых двигателей, следует отдавать приоритет совместимости таких топлив с аппаратурой, насосами, трубопроводами подачи топлива, форсунками и пр. оборудованием двигателя.

5. При рассмотрении альтернативных топлив с точки зрения выбросов ЗВ необходимо учитывать рабочие характеристики судового двигателя. Для этого может быть использована модель «черного ящика» и полилинейная регрессия, что позволит прогнозировать как характеристики двигателя на основе физико-химических свойств топлив, так и количество выбросов ЗВ.

6. Расчеты показали, что наибольшие выбросы при сжигании нефтяного дизельного топлива и биодизеля достигаются по оксидам азота и составляют 42,00 г/кг, наибольшие выбросы при сжигании биогаза достигаются по оксиду углерода – 23,30 г/кг. Наибольшее количество ЗВ, выделяющихся в процессе работы судовых ДВС выбрасываются при сжигании нефтяного дизельного топлива – 72,33 г/кг. Наименьшее количество ЗВ, выделяющихся в процессе работы судовых ДВС выбрасываются при сжигании диметилового эфира – 7,35 г/кг.

7. Наиболее значимыми свойствами топлив, влияющими на выбросы CO<sub>2</sub>, являются их плотность, теплотворная способность и вязкость. В свою очередь, эти свойства сильно влияют на расход топлива.

Таблица 1

Максимальный массовый выброс  $i$ -го вещества

Виды топлив	Мощность ДВС, кВт	Выброс, г/с						
		CO	NO <sub>x</sub>	CH	C	SO <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> O	БП
Дизельное топливо	809	1,236	2,247	0,225	0,112	0,031	0,018	0,157 · 10 <sup>-5</sup>
Биогаз		1,258	0,562	0,247	0,056	0,027	0,013	0,090 · 10 <sup>-5</sup>
Диметиловый эфир		-	1,685	0,169	-	-	-	-
Биодизель		0,921	2,247	0,169	0,090	-	0,019	0,169 · 10 <sup>-5</sup>
Биоэтанол		1,079	2,180	0,180	0,101	0,029	0,017	0,134 · 10 <sup>-5</sup>

#### Литература

1. Хорошев В.Г. Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках. [Электронный ресурс] – 2019 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/18355397>.
2. Таманджа И., Шуйтасов Н. Н. Перспективы и обоснование использования биодизеля в судовых дизельных установках // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. – 2009. - №1. – С. 158 – 166.
3. Гельфанд Е.Д. Технология биотоплив [Электронный ресурс] – 2019 – URL: <https://docviewer.yandex.ru/view/195454407>.
4. Черкаев Г.В., Чихонадских Е.А., Трохачева Е.В. Использование водорослей для решения вопросов экологической безопасности урбанизированных регионов // Экология и развитие общества. – 2020. - № 1(32). – С. 13-18.
5. Scott, S. A. Biodiesel from algae: Challenges and prospects/ M. P. Davey, J. S. Dennis, I. Horst, C. J. Howe, D. J. Lea-Smith, A. G. Smith// Current Opinion in Biotechnology. – 2010. – № 21.3. – P. 277–286.
6. Крылов И. Ф., Емельянов В. Е. Альтернативные дизельные топлива. Диметиловый эфир // Мир нефтепродуктов. – 2007. - № 2. – С. 38-39.
7. Wojcieszek, M., Kroyan, Y., Larmi, M., Kaario, O. et al., Effect of alternative fuels on marine engine performance. // SAE Technical Paper 2019-01-2230, 2019.

### References

1. Horoshev V.G. Perspektivy ispolzovaniya alternativnyh vidov topliva v sudovyh energeticheskikh ustanovkakh [Prospects for the use of alternative fuels in ship power plants] [Elektronnyj resurs] – 2019 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/18355397>.
2. Tamandzha I., Shujtasov N. N. Perspektivy i obosnovanie ispolzovaniya biodizelya v sudovyh dizelnyh ustanovkakh [Prospects and rationale for the use of biodiesel in marine diesel installations] // Vestnik AGTU. Morskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2009. - №1. – S. 158 – 166.
3. Gelfand E.D. Tekhnologiya biotopliv [Biofuel technology] [Elektronnyj resurs] – 2019 – URL: <https://docviewer.yandex.ru/view/195454407>.
4. Cherkaev G.V., CHihonadskih E.A., Trohacheva E.V. Ispolzovanie vodoroslej dlya resheniya voprosov ekologicheskoy bezopasnosti urbanizirovannyh regionov [The use of algae to address environmental safety issues in urbanized regions] // Ekologiya i razvitie obshchestva. – 2020. - № 1(32). – S. 13-18.
5. Scott, S. A. Biodiesel from algae: Challenges and prospects/ M. P. Davey, J. S. Dennis, I. Horst, C. J. Howe, D. J. Lea-Smith, A. G. Smith// Current Opinion in Biotechnology. – 2010. – № 21.3. – P. 277–286.
6. Krylov I. F., Emelyanov V. E. Alternativnye dizelnye topliva. Dimetilovyy efir [Alternative diesel fuels. Dimethyl ether] // Mir nefteproduktov. – 2007. - № 2. – S. 38-39.
7. Wojcieszek, M., Kroyan, Y., Larmi, M., Kaario, O. et al., Effect of alternative fuels on marine engine performance // SAE Technical Paper 2019-01-2230, 2019.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Георгий Владимирович Черкаев**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Экологии промышленных зон и акваторий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: [gcherkaev@mail.ru](mailto:gcherkaev@mail.ru)

**Georgiy V. Cherkaev**, Ph.D. (Eng), assistant professor assistant professor of the Department of the ecology of industrial zones and water areas, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: [gcherkaev@mail.ru](mailto:gcherkaev@mail.ru).

Поступила в редакцию: 26.11.2020

Принята к публикации: 12.02.2021

## ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.5.065.5

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.032

### Выделение марки углубления на изображении с использованием алгоритмов компьютерного зрения

**А.Н. Ивановский**<sup>1</sup> e-mail: bscadet@yandex.ru, **Н.Н. Марковкина**<sup>2</sup> e-mail: marine\_electronics@corp.smtu.ru, **С.Г. Черный**<sup>1</sup>, e-mail: sergiiblack@gmail.com

<sup>1</sup>Керченский государственный морской технологический университет, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** Снятие осадки судна – одна из ключевых операций на большинстве морских судов. Значение осадки используется при определении массы груза на судах типа балкер, а также при планировании перехода и обеспечении безопасности на всех других судах. Однако, если при планировании перехода погрешность в пять – десять сантиметров не играет существенной роли, то при определении загрузки судна каждый сантиметр ошибки может стоить компаниям тысячи, а то и десятки тысяч долларов США. Для определения осадки судна существует несколько способов, однако, несмотря на их наличие, в большинстве случаев измерения проводятся исключительно визуальным способом. Связано это с низкой точностью существующих методов, особенно в условиях волнения. В качестве направления исследования предлагается способ определения осадки судна при помощи алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения по видеозаписи. Обработка видео проводится покадрово.

Общее исследование предполагает наличие трех частей – выделение марки углубления на изображении, сегментацию водной поверхности на изображении и снятие замеров с их последующей обработкой методами математической статистики и линейной фильтрации. В данной работе описана первая часть исследования, целью которой является выявление марки углубления. Каждый кадр подвергается бинаризации при помощи порогового разделения, затем после проведения ряда морфологических операций проводится определение связных областей на кадре. На основании полученных областей строится координатная прямая, по которой и будет в дальнейшем производиться снятие осадки судна. В настоящее время, аналоги данной технологии отсутствуют на рынке. Также, исследование позволяет достичь высокой точности измерений даже при неблагоприятных погодных условиях.

**Ключевые слова:** драфт сурвей, марка углубления, осадка судна, сегментация, компьютерное зрение.

### Draft mark recognition with computer vision algorithms

**Aleksei N. Ivanovskii**<sup>1</sup> e-mail: bscadet@yandex.ru, **Natalia N. Markovkina**<sup>2</sup> e-mail: marine\_electronics@corp.smtu.ru, **Sergei G. Cherniy**<sup>1</sup>, e-mail: sergiiblack@gmail.com

<sup>1</sup>Kerch state maritime technological University, Kerch, Russian Federation

<sup>2</sup>St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Ship's draft marks reading is a key procedure in cargo operations on bulk carriers, as well it's significant part of passage planning and ensuring safety of navigation on all other ships. Though, whereas an error of five – ten centimeters doesn't affect too much on passage planning, it is weighty while talking about cargo operations, as each centimeter of error can cost companies thousands, or even dozens of thousands of US dollars. There are several ways to determine the ship's draft, nevertheless, visual readings are still the primary manner of carrying out mentioned procedure. That's caused by the reason of low accuracy of existing methods, especially in case of swell. In general, it is considered to describe alternative method for determining the ship's draft by using fundamentally new method, based on computer vision and machine learning technologies applied to video recording. Video processing is carried out frame by frame.

Full research assumes the presence of three parts - highlighting the draft mark's numerals on the image, segmentation of the water surface and taking measurements with their subsequent processing by methods of mathematical statistics and linear filtering. This paper describes the first part of research, so, there are threshold and morphological computer vision algorithms were applied. Thus, draft marks numerals segmentation was carried out. On the basis of the obtained areas, a coordinate line is constructed, along which the vessel's draft will be measured in the future. There are no analogues of this method on the market. Besides, the high level of measurement accuracy is expected to be achieved even in adverse weather conditions.

**Key words:** draft survey, draft marks, image segmentation, computer vision.

#### Введение

Как правило, определение осадки судна производится визуальным способом. Конечно, существуют различные устройства и приспособления, упрощающие как визуальные измерения, так и производящие определение осадки в автоматическом режиме. Однако, общим недостатком таких способов является низкая

точность измерений даже при сравнительно небольшом волнении [1].

В данной работе мы рассмотрим альтернативный способ определения осадки судна – с помощью алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения. Компьютерное зрение представляет собой большой набор алгоритмов, предназначенных для обнаружения, отслеживания и классификации объектов. Несмотря на значительные успехи компьютерного зрения, в морской отрасли данная

технология нашла применения лишь в нескольких задачах, например распознавание судов на изображениях со спутника, определение и трекинг людей на пассажирских судах, есть концепции по распознаванию типа судов по изображению с камеры и ряд других.

### Постановка и структура задачи определения осадки судна по видео

Касательно нашей задачи – значение осадки судна является ничем иным, как пересечением марки углубления с действующей ватерлинией. Действующая ватерлиния, в данном случае – плоскость, являющаяся усредненным значением водной поверхности.

Условно, задачу можно разбить на три части:

1. определение цифр марки углубления, определение масштаба изображения;
2. выделение водной поверхности на изображении, получение значения осадки;
3. фильтрация полученных данных, выработка конечного результата [2].

Первую часть задачи можно решить исключительно при помощи алгоритмов компьютерного зрения, основанных на математическом анализе изображений, не прибегая к алгоритмам глубокого обучения. В отличие от первой части, вторая часть подразумевает использование нейронных сетей для распознавания цифр, а также для сегментации водной поверхности. Распознать цифры при помощи классических алгоритмов для работы с морфологией изображения можно, однако ввиду особенностей нанесения цифр, а также получаемых изображений, высока вероятность, что алгоритм не сможет отличить цифры 0, 6 и 8 друг от друга, что, фактически, делает такие алгоритмы бесполезными в рамках нашей задачи. Аналогичная проблема и с выделением водной поверхности на изображении – в данном случае сверточные нейронные сети должны показать более высокую точность [3][4], нежели классические алгоритмы сегментации.

Третьим этапом должна стать обработка массива данных, полученного в результате выполнения предыдущих двух этапов. Каждое значение данного массива представляет собой координаты точки пересечения координатной прямой, полученной на первом этапе, и линию водной поверхности, полученной на втором этапе. Поскольку при снятии осадок судна все грузовые операции останавливаются, а судно находится в неподвижном состоянии, можно принять, что осадка судна является константой, тогда, соответственно, колебания водной поверхности являются шумом, соответственно искомую величину можно представить как (1):

$$T = f(t) - \xi(t) \quad (1),$$

где  $T$  - полезный сигнал (средняя осадка),  $f(t)$  - массив измерений,  $\xi(t)$  - совокупность шума, колебаний и т.д. Стоит отметить, что в нашем случае процесс является эргодическим, то есть для оценки ансамбля измерений при прочих равных составляющих возможно использование лишь одной

выборки, а время производства замеров и характер колебаний водной поверхности не будут играть существенной роли. Для строгого доказательства эргодичности необходимо построить математическую модель судна, а также водной поверхности, что само по себе являлось бы решением широкого круга задач морской отрасли. Однако, поскольку это, по очевидным причинам, невозможно, придется воспользоваться эмпирическими данными – посредством снятия большого числа видео при схожих условиях.

### Выделение марки углубления на изображении с использованием алгоритмов компьютерного зрения

Каждый из этапов решения задачи определения осадки судна заслуживает отдельной статьи, ввиду многообразия способов реализации каждого из этапов. В данной работе сосредоточимся на первой части задачи определения осадки судна, в целях которой – определение марок углубления и вычисление масштаба изображения. Также, целью данной работы является определение общих принципов решения задач распознавания образов и получение готового результата в кратчайшие сроки. Задача поиска наилучшего алгоритма не стоит, поскольку оценка вычислительной сложности алгоритмов компьютерного зрения в контексте данной задачи заслуживает отдельного внимания.

Массивы исходных данных мы будем получать посредством видеосъемки. В большинстве случаев период колебаний водной поверхности не превышает десяти секунд, поэтому видео длительностью в одну минуту будет вполне достаточно. Обработать видео мы будем пок кадрово. При частоте в 30 fps (кадров в секунду) минутное видео содержит 1800 кадров, что потенциально дает 1800 значений осадки.

В общем смысле, операция выделения объектов на изображении называется сегментацией. В практических приложениях, рассчитанных на использование в реальном времени, работа с изображением обычно происходит в следующей последовательности [5][6]:

1. получение изображения;
2. бинаризация;
3. морфология;
4. разметка;
5. сбор признаков.

### Сбор данных

В нашем случае изображение получаем с видеокamеры. Качество съемки и начальное разрешение матрицы камеры напрямую влияет на возможную точность измерений. Выбор камеры не принципиален, однако оптимально подойдут Go Pro Hero 9, либо DGI Osmo Action, которые позволяют снимать 4K видео. Также, отличным решением будет использование электронного стабилизатора. Электронный стабилизатор в сочетании с цифровым позволят избавиться от значительного количества вибраций и шумов, возникающих из-за резкого сдвига камеры, что особенно важно при съемке с катера или лодки.



### Бинаризация

Следующим шагом является бинаризация. Поскольку изначально наше изображение представлено в формате RGB, его необходимо представить в оттенках серого. Для этого вычисляется относительная яркость каждого пикселя по определенным алгоритмам [7]. Обратим внимание, что обычно марки углублений вырезают из листовой стали и приваривают или накернивают (набивают углубления) на корпус судна. Как правило, они выделяются светлой краской на темном фоне и темной краской на светлом. Такая раскраска обеспечивает высокую контрастность, что позволяет провести пороговое разделение (thresholding), при этом все пиксели, значение которых выше порогового окрашиваются в белый, остальные – в черный (рис. 1). Стоит упомянуть, что каждому пикселю соответствует значение от 0 (черный) до 256 (белый). Так как марки углубления достаточно яркие, порог можно установить на уровне 230-240.



Рис. 1. Перевод изображения в бинарный вид

Очевидно, что помимо самих марок углубления в бинарное изображение могут попасть блики, отражения от водной поверхности, случайные шумы. Полезной информации они не несут. Чтобы избавиться от таких объектов обычно используется два алгоритма – эрозия, и обратный процесс – дилатация. В нашем случае блики, оказавшиеся на воде, отсекутся линией водной поверхности, которую мы получим во второй части работы, а данные алгоритмы будут полезны при исключении бликов на корпусе судна.

### Морфологические операции

После бинаризации выполняются морфологические операции. Термин морфология относится к описанию свойств формы и структуры каких-либо объектов. Математическая морфология представляет собой раздел теории множеств. В контексте компьютерного зрения в качестве таких множеств выступают группы пикселей, которые можно рассматривать в качестве объектов морфологических операций. В целях нашей задачи – необходимо определить цифры марки углубления.

После их успешной классификации мы сможем задать координатную шкалу, по которой и будем искать пересечение с водной поверхностью.

Мы можем использовать готовые решения, например, алгоритм watershed из библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Алгоритм находит границы объектов на бинарном изображении. При этом границы являются полной характеристикой объекта, и занимают мало места в памяти, хотя на данный момент это преимущество уходит на второй план. Пример работы алгоритма на рис. 2.

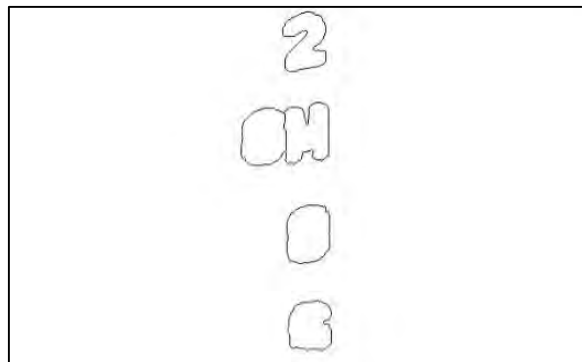


Рис. 2. Границы марок углубления, полученные при помощи алгоритма watershed.

Также, классическим является алгоритм поиска связанных областей на изображении. За основу возьмем алгоритм разметки бинарного изображения. Его суть состоит в том, что мы применяем угловую маску последовательно на всем изображении, и, в зависимости от пересечения маски с объектами на изображении, определяем к какой группе принадлежит тот или иной пиксель. На рисунке 3 показан результат работы алгоритма поиска связанных областей, на рисунке 4 листинг кода программы связанных областей, реализованный на python.

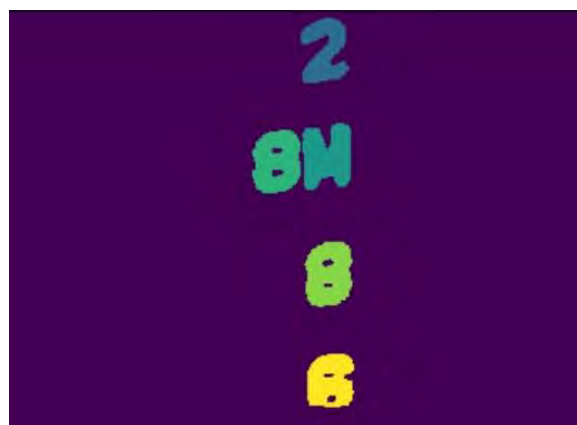


Рис. 3. Реализация поиска связанных областей на изображении

```

73 for i in range(m):
74     for j in range(n):
75         kn = j-1
76         if kn <= 0:
77             kn = 1
78             B = 0
79         else:
80             B = Image[i][kn]
81             km = i-1
82         if km <= 0:
83             km = 1
84             C = 0
85         else:
86             C = Image[km][j]
87     A = Image[i][j]
88     if A==0:
89         pass
90     elif (B==0) and (C==0):
91         cur = cur + 1
92         Image[i][j] = cur
93     elif (B!=0)and(C==0):
94         Image[i][j] = B
95     elif (B==0) and (C!=0):
96         Image[i][j] = C
97     elif (B!=0) and (C!=0):
98         if (B==C):
99             Image[i][j] = B
100        else:
101            Image[i][j] = B
102            for k in range(m-1):
103                for l in range(n-1):
104                    if Image[k][l]==C:
105                        Image[k][l]=B

```

Рис. 4. Листинг программы поиска связанных областей

Наглядно процесс обхода изображения углоковой маской показан на рисунке 5. Всего возможно пять различных положений маски относительно изображения. Подробнее об этом написано в источнике [8]. Кроме того, в листинге программы эти положения соответствуют набору условных операций, находящихся с 88 по 97 строку.

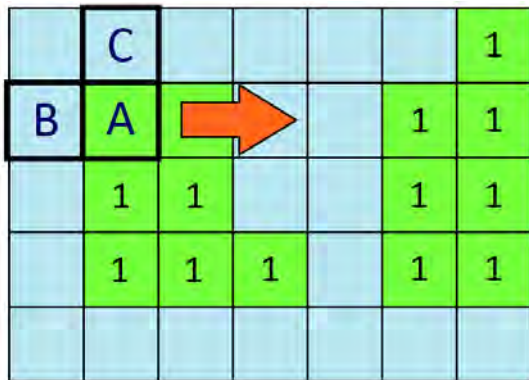


Рис. 5. Обход изображения углоковой маской

Нельзя не обратить внимание на тот факт, что объекты, которые мы стремимся выделить на изображении стандартизированы, и было бы логично искать их по уже заранее известным признакам. Тогда задачу можно представить в виде поиска заранее известных объектов на изображении. Классическими для решения таких задач являются:

1. Алгоритмы сравнения шаблонов (попиксельно сравнивают шаблон с областями на исследуемом изображении);

2. Алгоритмы – детекторы. Суть их работы состоит в поиске ключевых точек, которые обычно соответствуют углам и резким перепадам яркости. Наиболее известные: алгоритм Харриса, FAST, BRIEF, SIFT, SURF (отметим, что два последних запатентованы);

3. Алгоритмы определения контуров. Классическими принято считать алгоритмы Канны, Собеля.

В нашем случае эти алгоритмы могут быть применены с различной эффективностью, ввиду особенностей объектов на изображении. Так, при попиксельном сравнении кадра с шаблоном, цифры практически не отличаются друг от друга. Поиск ключевых точек так же ведет себя нестабильно. Поиск границ применим, однако при обработке некоторых кадров это потребует дополнительной ручной настройки.

Конечно, существуют и другие алгоритмы для сегментации изображения и выделения на нем областей с определенными признаками. Выбор алгоритма может зависеть от выбранного языка программирования, от личных предпочтений, от характера объектов, подлежащих обнаружению и т.д. Для реализации алгоритмов в данной работе использован язык программирования Python 3, а также библиотека компьютерного зрения OpenCV.

**Построение шкалы грузовой марки**

После выделения цифр марки углубления на кадре, необходимо построить координатную прямую на изображении. Для этого вычисляем геометрические центры каждой из цифр. Их можно вычислить как среднее арифметическое по координатам всех пикселей соответствующего класса. Координатная прямая будет являться результатом аппроксимации полученных точек линейной функцией. Цифру 8 в данном случае исключаем из рассмотрения.

Заметим, что ввиду специфики цветопередачи камеры, высота цифр на изображении выше, чем высота отступов между цифрами. Тогда, масштаб изображения мы будем считать не по точкам пересечения полученной прямой и границ цифр, а по взаимному расположению цифр друг относительно друга, исключая из внимания объекты, пересекающие границу изображения, либо водную поверхность. В примере, представленном на рисунке 6, масштаб составляет 58 пикселей на 10 сантиметров. Предельная точность составит 1,7 миллиметра (высота одного пикселя).

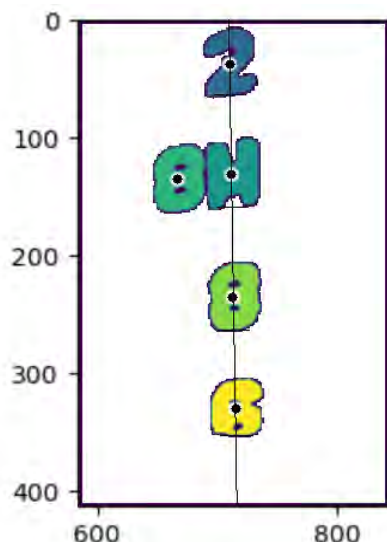


Рис. 6. Центры объектов и координатная прямая на изображении.

### Заключение

На данном этапе решение первой части задачи определения осадки по видео можно считать оконченной. В данной статье мы рассмотрели ряд классических алгоритмов компьютерного зрения, определили цифры марки углубления, определили масштаб изображения.

Методы, рассмотренные в статье, обладают рядом преимуществ перед глубоким обучением. Так, не требуется большое количество размеченных данных, такие алгоритмы проще отлаживать, они весьма производительны, эффективны и поддаются оптимизации. Однако, такие алгоритмы не универсальны, и не каждую задачу можно решить эффективно.

В перспективах дальнейших исследований – оценить скорость и качество работы различных алгоритмов, оптимизировать данный этап задачи. Также, необходимо реализовать еще две части задачи – произвести сегментацию морской поверхности на изображении и обработку конечного результата методами линейной фильтрации.

### Литература

1. Заявка 2018100528 Российская Федерация, МПК В63В 39/12 (2006.01). Способ определения осадки судна / Дорошенко С.Ю. (РФ), Дубинко Т.Ю. (РФ), Ольховик Е.О. (РФ), Тхоржевская Н.О. (РФ); патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова"; заявл. 09.01.2018; опубл. 28.02.2019, Бюл. № 7; RU 2680944 C1 – 8 с.
2. Zhilenkov, A. A. (2018) High productivity numerical computations for gas dynamics modelling based on DFT and approximation. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 400-403, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317117
3. Виноградов, В. Н. Корреляционная теория фильтрации и управления многомерными случайными процессами: Линейная корреляционная теория фильтрации и управления. / В.Н. Виноградов – М.: КРАСАНД, 2012. – 320 с.
4. Хайкин, Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», ISBN 978-5-8459-0890-2, 2006. – 1104 с.
5. Dang, B., & Zhilenkov, A. (2018). Finite precision modeling of radar digital chaotic systems with dynamical properties analysis. AIP Conference Proceedings, 2034, 020007. doi: 10.1063/1.5067350
6. Кеннет Доусон-Хоу, Практическое введение в компьютерное зрение с OpenCV. / Кеннет Доусон-Хоу – Willey, Нью-Дели, ISBN: 9781118848456, 2014. – 235 с.
7. Йозеф Хоуз, Пратик Джоши, Михаэль Бейлер, OpenCV: Проекты компьютерного зрения на Python. Путь изучения – Packt>, Бирмингем, ISBN 978-1-78712-549-0, 2016. – 558 с.
8. Об относительной яркости, или насколько живучим бывает легаси [Электронный ресурс] – 2016 – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/304210/>
9. Подсчет объектов на бинарном изображении. Часть 1 [Электронный ресурс] – 2011 – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/119244/>
10. Zhilenkov, A. A. & Epifantsev, I. R. (2018) Problems of a trajectory planning in autonomous navigation systems based on technical vision and AI. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 1032-1035, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317265

### References

1. Application 2018100528 Russian Federation, IPC B63B 39/12 (2006.01). Methods of the vessel's draft determining / Doroshenko S.Yu. (RF), Dubinko T.Yu (RF), Olkhovik E.O. (RF), Tkhorzhevskaya N.O. (RF); patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "State University of Maritime and River Fleet named after Admiral SO Makarov"; declared 01/09/2018; publ. 28.02.2019, Bul. No. 7; RU 2680944 C1 - 8 p.
2. Zhilenkov, A. A. (2018) High productivity numerical computations for gas dynamics modelling based on DFT and approximation. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 400-403, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317117
3. Vinogradov, V.N. Correlation theory of filtration and control of multidimensional random processes: Linear correlation theory of filtration and control. / V.N. Vinogradov – M.: KRASAND, 2012. – 320 p.
4. Haykin, Simon Neural Networks Prentice Hall, NJ : Upper Saddle River, ISBN 978-5-8459-0890-2, 2006. – 1104 p.
5. Dang, B., & Zhilenkov, A. (2018). Finite precision modeling of radar digital chaotic systems with dynamical properties analysis. AIP Conference Proceedings, 2034, 020007. doi: 10.1063/1.5067350

6. Kenneth Dawson-Howe, A practical introduction to computer vision with OpenCV. / Kenneth Dawson-Howe – Willey, New-Dehli, ISBN: 9781118848456, 2014. – 235 p.
7. Joseph Howse, Prateek Joshi, Michael Beyeler, OpenCV: Computer Vision Projects with Python. Learning Path – Packt>, Birmingham, ISBN 978-1-78712-549-0, 2016. – 558 p.
8. About the relative brightness, or how tenacious legacy is [Electronic resource] - 2016 - Access mode: <https://habr.com/ru/post/304210/>
9. Counting objects on a binary image. Part 1 [Electronic resource] - 2016 - Access mode: <https://habr.com/ru/post/119244/>
10. Zhilenkov, A. A. & Epifantsev, I. R. (2018) Problems of a trajectory planning in autonomous navigation systems based on technical vision and AI. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 1032-1035, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317265

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

**Алексей Николаевич Ивановский**, аспирант кафедры «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики», Керченский Государственный Морской Технологический Университет, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail: bscadet@yandex.ru

**Aleksei N. Ivanovskii**, graduate student of the Department "Operation of ship electrical equipment and automation", Kerch State Maritime Technological University, 298309, Republic of Crimea, Kerch, st. Ordzhonikidze, 82, e-mail: bscadet@yandex.ru

**Наталья Николаевна Марковкина**, кандидат технических наук, доцент кафедры киберфизических систем Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 198303, г. Санкт-Петербург, ул. Ленинский проспект, 101, e-mail: marine\_electronics@corp.smtu.ru

**Markovkina Natalia Nikolaevna**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Cyber-Physical Systems St. Petersburg State Marine Technical University, 198303, St. Petersburg, st. Leninsky prospect, 101, e-mail: marine\_electronics@corp.smtu.ru

**Сергей Григорьевич Черный**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики», Керченский Государственный Морской Технологический Университет, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail: sergiiblack@gmail.com

**Sergei G. Chernyi**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the of the Department of "Operation of ship electrical equipment and automation", Kerch State Maritime Technological University, 298309, Crimea, Kerch, st. Ordzhonikidze, 82, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.01.2021  
Принята к публикации: 15.02.2021



## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 534.232: 678.686:621.315.612

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.033

### Исследование влияния наполнителей системы ЦТС на структуру и физико-механические характеристики эпоксидного клея ДМ-5-65

И.В. Баранец<sup>1</sup> e-mail: baranets@mail.ru, Г.В. Ваганов<sup>2</sup> e-mail: glebvaganov@mail.ru,  
Л.В. Гайдукова<sup>1</sup> e-mail: 9111149627@mail.ru, А.В. Краснов<sup>3</sup> e-mail: clepto@inbox.ru,  
Ф.Ф. Легуша<sup>4</sup> e-mail: legusha@smtu.ru, Г.А. Никитин<sup>3</sup> e-mail: nikitin\_german@mail.ru,  
С.И. Пугачев<sup>3</sup> e-mail: spugachev@bk.ru, Е.Ю. Рытов<sup>4</sup> e-mail: physics\_spbmtu@mail.ru

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт синтетического каучука, <sup>2</sup>Институт высокомолекулярных соединений РАН, <sup>3</sup>Концерн «МПО-Гидроприбор», <sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация.** В работе исследуются структура и физико-механические характеристики наполненного эпоксидного клея ДМ-5-65, применяемого для сборки составных электроакустических преобразователей гидроакустических систем. Особенностью исследования служит использование в качестве дисперсных неорганических наполнителей порошков пьезокерамических материалов системы цирконата-титаната свинца (ЦТС): ЦТСтБС-2 и ЦТБС-3. Приведены результаты морфологического исследования, определены краевой угол смачивания и свободная поверхностная энергия отвержденного клея ДМ-5-65, содержащего указанные наполнители. Определены плотность, деформационно-прочностные и термомеханические свойства отвержденного клея ДМ-5-65. Механическими испытаниями на отрыв установлена прочность соединения эпоксидного клея ДМ-5-65 с металлом. Показано, что химическая природа наполнителей определяет характер их распределения в связующем клею. Установлен преимущественно полярный характер взаимодействия клея ДМ-5-65, содержащего в качестве наполнителя материал ЦТСтБС-2, в отличие от дисперсионной природы взаимодействий клея ДМ-5-65 с наполнителем ЦТБС-3.

**Ключевые слова:** эпоксидный клей, наполнитель, пьезокерамические материалы, структура клея, краевой угол смачивания, механические свойства клея, механическая прочность соединений клей-металл.

### Study of the effect of fillers PZT on the structure and physical-mechanical properties of epoxy glue DM-5-65

Irina V. Baranets<sup>1</sup> e-mail: baranets@mail.ru, Gleb V. Vaganov<sup>2</sup> e-mail: glebvaganov@mail.ru,  
Ludmila V. Gaydukova<sup>1</sup> e-mail: 9111149627@mail.ru, Aleksey V. Krasnov<sup>3</sup> e-mail: clepto@inbox.ru,  
Fedor F. Legusha<sup>4</sup>, German A. Nikitin<sup>3</sup> e-mail: nikitin\_german@mail.ru,  
Sergey I. Pugachev<sup>3</sup> e-mail: spugachev@bk.ru, Evgeny Yu. Rytov<sup>4</sup> e-mail: physics\_spbmtu@mail.ru

<sup>1</sup>Research Institute of synthetic caoutchouc, <sup>2</sup>Institute of Molecular Compounds of the Russian Academy of Sciences, <sup>3</sup>Concern «SUW – Gidropribor», <sup>4</sup>St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

**Abstract.** This paper studies the structure and physical-mechanical properties of filled epoxy glue DM-5-65 used to build a composite electro-acoustic transducers hydroacoustic systems. A special feature of the study is the use of powders of piezoceramic materials of the lead zirconate-titanate (PZT) system as dispersed inorganic fillers: PZTSrB-2 and PZTB-3. The results of morphological research are presented, the wetting angle and free surface energy of the cured DM-5-65 glue containing the specified fillers are determined. The density, strain-strength and thermomechanical properties of the cured DM-5-65 glue were determined. Mechanical separation tests established the strength of the connection of the DM-5-65 epoxy glue with metal. It is shown that the chemical nature of fillers determines the nature of their distribution in the glue binder. The predominantly polar nature of the interactions of DM-5-65 glue containing PZTSrB-2 material as a filler is established, in contrast to the dispersion nature of the interactions of DM-5-65 glue with PZTB-3 filler.

**Keywords:** epoxy glue, filler, piezoceramic materials, the structure of the glue, wetting angle, the mechanical properties of the glue, the mechanical strength of joints glue-metal.

#### Введение

В работе [1], содержащей результаты комплексного исследования эпоксидного клея ДМ-5-65 с неорганическими наполнителями системы титаната бария (ТБ и ТБК-3) и цирконата-титаната свинца (ЦТБС-3 и ЦТС-19), была показана роль химической природы наполнителей в их распределении в связующем, взаимной упорядоченности макромолекул матрицы, создании свободной энергии. Логическим развитием этой работы явилось исследование характеристик составных электроакустических преобразователей, в которых соединение активных (пьезокерамических)

элементов осуществляется с применением клея ДМ-5-65, содержащего приведенные выше пьезокерамические наполнители [2]. Из рекомендаций работы [2] следует, что повышение качества сборки преобразователей может обеспечиваться приближением природы пьезокерамического наполнителя к природе применяемой в преобразователе пьезокерамики. Поэтому целью настоящей работы явилось комплексное исследование влияния пьезокерамических наполнителей ЦТСтБС-2 и ЦТБС-3 на свойства клея ДМ-5-65: плотность, прочность, смачивание, свободную энергию

поверхности, топографию керамической основы и связующего.

### 1. Методики исследования

Морфологические исследования выполнены на аналитическом комплексе, включающем оптический микроскоп Leica DM-2500, цветную цифровую камеру высокого разрешения Leica DFC-420C и специализированную компьютерную станцию. Захват, архивирование и количественная обработка изображений реализованы с помощью программного обеспечения Leica Application Suite. Морфология керамической основы, характер ее распределения и двулучепреломления в матрице клея ДМ-5-65 исследованы в порошках и на срезах клеевых слоев на просвет в диапазоне длин волн от 200 до 1200 нм в режимах светлое поле, темное поле, фазовый контраст, скрещенные николи [3] при увеличении от  $130\times$  до  $1820\times$ . Томография клеевых соединений ДМ-5-65, отвержденных на стали X18H10T, проведена посредством послойного сканирования образца по глубине с шагом 1 мкм. Основные результаты представлены в виде микрофотографий.

Измерения краевого угла смачивания между жидкостью и твердой поверхностью в среде воздуха проведены на приборе Kruss DSA 30. Определение статического краевого угла смачивания проведено по методу лежащей капли [4]. Анализ капли производился методом Юнга-Лапласа [5] при объеме капли равном 7 мкл, дозированной шприцом с ценой деления 0,3 мкл. В методе оценивается полный контур капли и учитываются не только межфазные взаимодействия, определяющие контур капли, но и вклад веса жидкости капли. Краевой угол определяется как наклон касательной в точке касания трех фаз.

Расчет свободной энергии поверхности проведен по методу Оуэнса-Вендта-Рабея-Кьельбле (ОВРК) [6], в котором используются значения краевого угла смачивания лежащей на твердой поверхности капли для двух жидкостей с известными полярной и дисперсной составляющими поверхностного натяжения дистиллированной воды ( $52.20^0$  и  $19.90^0$  соответственно) и глицерина ( $41.50^0$  и  $21.20^0$  соответственно). Все расчеты выполнены в программе DSA4.

Определение плотности отвержденного клея ДМ-5-65, содержащего наполнитель ЦТСтБС-2 или ЦТБС-3, проведено методом гидростатического взвешивания с точностью  $\pm 0,001$  г/см<sup>3</sup>. По результатам эксперимента – не менее 15 измерений для каждого состава – рассчитаны среднее арифметическое и среднее квадратичное отклонение значений плотности.

Прочность соединений клей-металл определяли по ГОСТ 14760-69 при нормальной температуре. Для испытаний использовали стандартные грибки из стали X18H10T. Перед склеиванием поверхности грибков подвергали пескоструйной обработке. Испытания проведены на универсальной испытательной машине LFM-50 фирмы «Walter+Wai AG» при скорости движения захватов 10 мм/мин.

Определение деформационно прочностных и термомеханических свойств. Образцы клея ДМ-5-65, отвержденного при температуре  $+65^{\circ}\text{C}$  в течении 48 часов, в форме лопаток длиной 50 мм, шириной 4,5 мм и высотой 2 мм, испытывали в режиме

одноосного растяжения на универсальной разрывной установке Electropulse 1000 (США) при скорости растяжения 1 мм/мин. По результатам испытаний определены значения модуля упругости, напряжения и деформации при разрушении образцов. Данные представлены в виде численных значений. Термомеханические свойства образцов определены методом динамического механического анализа на установке Electropulse 1000 в режиме растяжения в диапазоне температур ( $30\dots 150^{\circ}\text{C}$ ) при скорости нагрева  $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , амплитуде колебаний 20 мкм и частоте 10 Гц. По результатам эксперимента определили температуру стеклования образца, как максимум тангенса угла механических потерь на кривой зависимости тангенса от температуры.

### 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследованием морфологии порошков материалов ЦТСтБС-2 и ЦТБС-3 установлено, что частицы порошка сформированы в виде сферических (либо округлых) оптически плотных гранул с размерами от 11 до 133 мкм для материала ЦТСтБС-2 и от 7 до 113 мкм для материала ЦТБС-3 (рис. 1).

Оптическая плотность гранул материала ЦТСтБС-2 (состав:  $0,98 [(Pb_{0,86} Sr_{0,07} Ba_{0,07})(Zr_{0,535} Ti_{0,465})O_3 + 0,02 [ZnBiMn_{1/4}]O_3 + 0,65 \text{ мол}\%La_2O_3)$ ) не варьируется (рис. 1а). При малых сдвиговых усилиях гранулы распадаются на фрагменты произвольной формы с размерами от 1 мкм до 62 мкм, обладающие интенсивным двулучепреломлением, что указывает на сильное взаимодействие составляющих материала ЦТСтБС-2 между собой. Двулучепреломляющие зерна внутри фрагментов гранул неразличимы (рис. 1б). Одновременно в материале ЦТБС-3 обнаружено значительное число гранул с рыхлой упаковкой частиц керамической основы. Их размеры варьируются от 7 мкм до 34 мкм (рис. 1в). Исследование в режиме «скрещенные николи» выявило двулучепреломление зерен диаметром от 0,7 мкм до 1,2 мкм в составе «рыхлых» гранул (рис. 1г).

Исследование морфологии отвержденных при  $+65^{\circ}\text{C}$  клеев ДМ-5-65, содержащих материал ЦТСтБС-2 или ЦТБС-3, показало, что частицы наполнителей из этих материалов распределены равномерно по объему образцов (рис. 2).

Флукутации концентрации (области клея, обогащенные частицами наполнителя) имеют размеры от 4,0 мкм до 8,3 мкм для клея с ЦТСтБС-2 и от 4,5 мкм до 10,8 мкм для клея с ЦТБС-3, что существенно меньше размеров вводимых в связующее гранул. Связующее расположено в отвержденном клее в виде тонких (шириной 0,1...0,3 мкм) прослоек, образующих объемную пространственную сетку (рис. 2).

Проведена томография – послойное сканирование образцов с шагом 1 мкм на глубину 92 мкм – срезов клеев, отвержденных на стали X18H10T при температуре  $+65^{\circ}\text{C}$ . Установлено, что клей, содержащий наполнитель ЦТБС-3, армируется объемно-пространственной сеткой тонких слоев связующего, пронизывающих весь образец. Регулярной периодической структуры частиц наполнителя в нем не обнаружено. В то же время отвержденный в тех же условиях клей, содержащий

наполнитель ЦТСтБС-2, характеризуется регулярной пространственной упорядоченностью частиц керамической смеси, окруженных связующим.

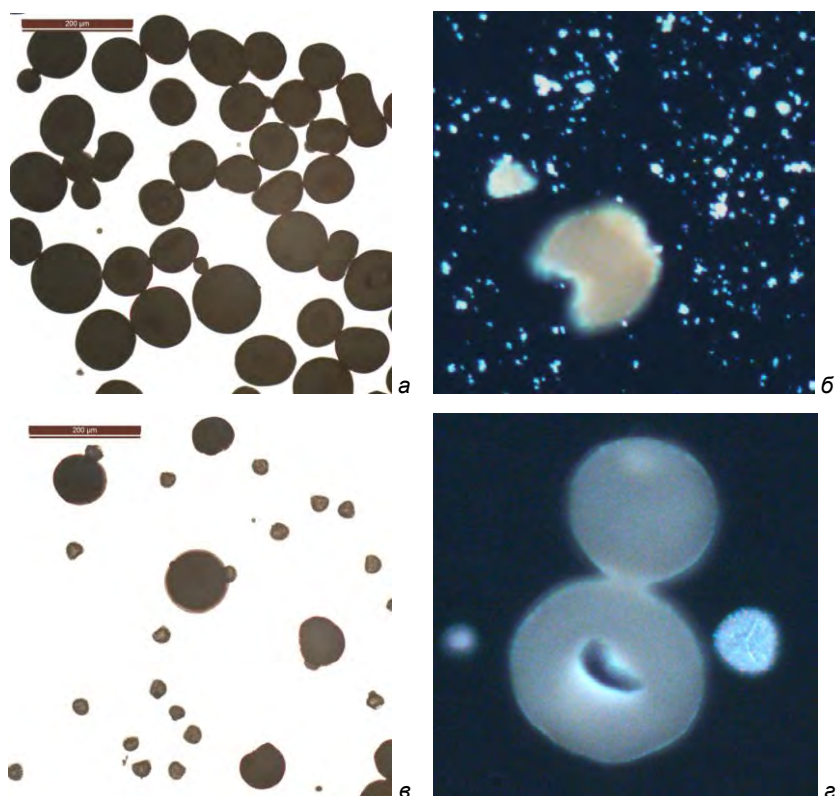


Рис. 1. Микрофотографии гранул материалов ЦТСтБС-2 (а, б) и ЦТБС-3 (в, г).

Режим: а, в – светлое поле, б, г – скрещенные николи. Размер кадра: а, в – (700 × 700) мкм, б, г – (200 × 200) мкм.

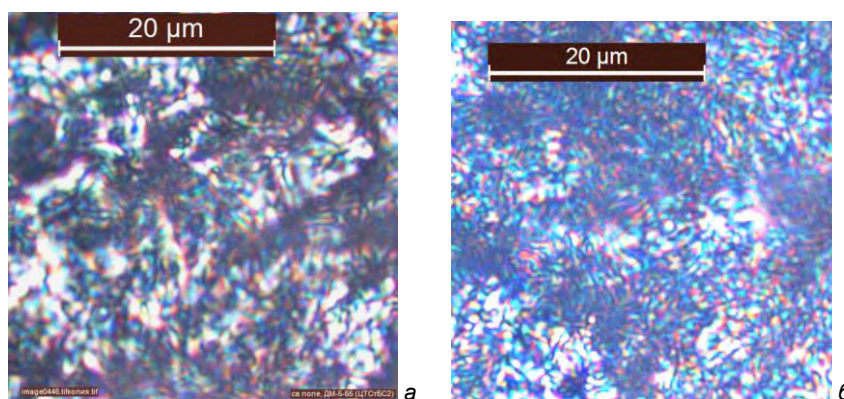


Рис. 2 Микрофотографии отвержденного при + 65°C клея ДМ-5-65 с наполнителем ЦТСтБС-2 (а) и ЦТБС-3 (б).

Режим: светлое поле. Размер кадра: (35 × 35) мкм.

На рис. 3 представлены микрофотографии, отражающие морфологию слоев образца высотой 3 мкм (равной глубине резкости в данном исследовании) и последовательно отстоящие друг от друга по высоте среза клеевого слоя на расстоянии 10 мкм. Многокомпонентный состав пьезокерамической смеси проявляется в варьировании дисперсионной окраски индивидуальных частиц [7]. На рис. 3а присутствуют сетчатые образования из цепочечных структур, состоящих из однотипных по химической природе

частиц керамической смеси. Цепочки ориентированы под углом 60° друг к другу и армируют клеевой слой.

В слое клея, расположенном в глубине среза через 10 мкм, различимы концентрические регулярные структуры (рис. 3б). На рис. 3в (дополнительное проникновение на 10 мкм вглубь образца) представлены четко очерченные гексагональные либо пятиугольные области плотно упакованных частиц наполнителя ЦТСтБС-2. Размер областей варьируется от 7 мкм до 10 мкм, толщина перемычек – от 0,9 мкм до 1,6 мкм.



Микрофотографии на рис. 3 а, б, в, г получены без перемещения образца в горизонтальной плоскости. Морфология слоев клея, удаленных друг от друга по высоте на 14 мкм, идентична. То есть, наполнитель

ЦТСтБС-2 образует в связующем регулярную, пространственно организованную структуру, обладающую двулучепреломлением (рис. 3 г).

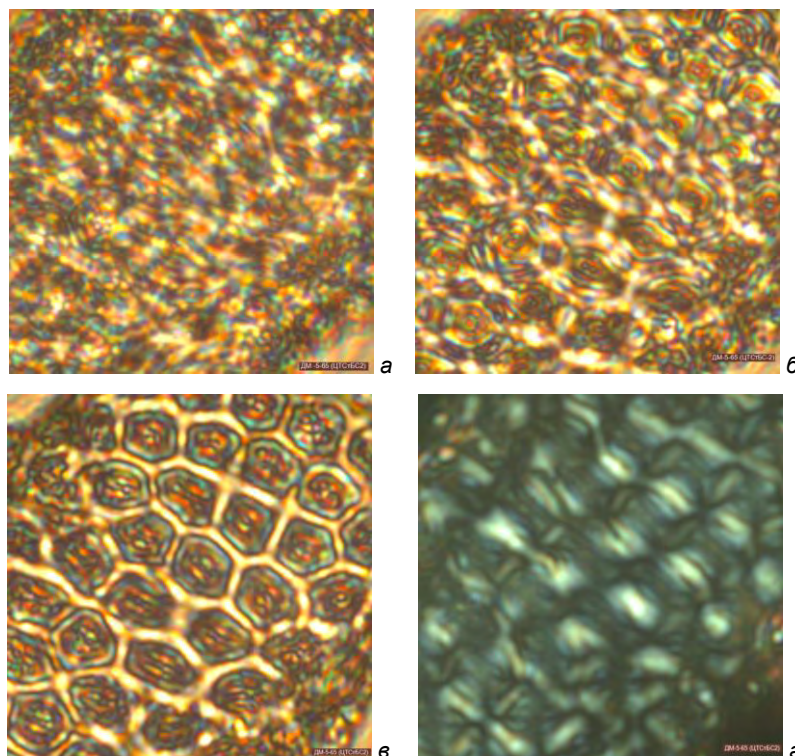


Рис. 3. Томография клея ДМ-5-65 с наполнителем ЦТСтБС-2 (клей-металл (сталь X18H10T)) по глубине среза с интервалом 10 мкм (а, б, в). Размер кадра (50 × 50) мкм. Режимы: а, б, в – светлое поле, г – скрещенные николи.  
«в» и «г» – один и тот же участок образца без смещения по вертикали и горизонтали.

Таблица 1

Свободная энергия поверхности применяемых материалов (мН/м)

Материал	Полная энергия	Дисперсионная составляющая	Полярная составляющая
Серебро на керамике	138,3±9,3	45,1±4,2	93,2±4,6
Сталь X18H10T	1437,9±94,9	805,9±61,2	632,0±33,8
ДМ-5-65 (ЦТСтБС-2)	23,5±4,1	0,9±0,9	22,5±3,1
ДМ-5-65 (ЦТБС-3)	124,4±23,3	123,2±22,0	1,3±1,3

Определен краевой угол смачивания каплей клея, содержащего наполнитель ЦТСтБС-2 или ЦТБС-3, серебряного покрытия на поверхности пьезокерамики. Через 30 минут после нанесения клея на субстрат углы смачивания составили  $37^{\circ} \pm 3^{\circ}$  и  $54^{\circ} \pm 4^{\circ}$  при наполнителях ЦТСтБС-2 и ЦТБС-3 соответственно. Краевой угол смачивания клеев с наполнителями ЦТСтБС-2 и ЦТБС-3 дистиллированной водой составляет соответственно  $84,4^{\circ} \pm 3,4^{\circ}$  и  $93,7^{\circ} \pm 6,3^{\circ}$ . Значения свободной энергии поверхности подложек и клея, содержащего наполнители, представлены в табл. 1.

Расчет свободной энергии поверхности, определенной по методу ОВРК, показал, что природа взаимодействий на поверхности пьезокерамики, покрытой слоем серебра, является преимущественно полярной. В то же время на поверхности стали X18H10T практически

сбалансированы дисперсионные и полярные взаимодействия.

Из таблицы 1 видно, что свободная энергия поверхности отвержденного на стали клея ДМ-5-65, содержащего наполнитель ЦТСтБС-2, характеризуется преимущественно полярной составляющей в отличие от дисперсионного характера свободной энергии поверхности, отвержденного на стали клея ДМ-5-65, содержащего наполнитель ЦТБС-3.

Согласно данным работы [8], дисперсионные взаимодействия особенно существенны при взаимодействии частиц дисперсной фазы через прослойки дисперсионной среды. В то же время, полярные взаимодействия, обусловленные присутствием постоянных диполей, действуют между ближайшими соседями и в отличие от дисперсионных взаимодействий не суммируются на



больших расстояниях в объеме фаз. Эти суждения находятся в полном соответствии с изложенными выше экспериментальными результатами морфологических исследований клеев ДМ-5-65, содержащих наполнитель ЦТСтБС-2 или ЦТБС-3. При этом удельная свободная энергия в случае образования в системе упорядоченных блоков, как правило, мала [8]. Из таблицы 1 следует, что клей ДМ-5-65 с наполнителем ЦТСтБС-2 характеризуется существенно меньшей величиной свободной энергии поверхности, чем тот же клей, содержащий наполнитель ЦТБС-3.

Общепринято, что хорошее смачивание может обеспечиваться либо близостью природы жидкости и субстрата, либо низкой поверхностной энергией жидкости. Облегчение смачивания «полярного»

серебряного покрытия на керамической основе клеем ДМ-5-65, содержащим материал ЦТСтБС-2, по сравнению с тем же клеем, содержащим материал ЦТБС-3, обусловлено, вероятно, и полярным характером взаимодействий клея ДМ-5-65 с наполнителем ЦТСтБС-2, и низкой величиной поверхностного натяжения, численно равного свободной энергии поверхности.

Измерение плотности образцов отвержденного при + 65°C в течение 48 часов клея ДМ-5-65 разного состава по методу гидростатического взвешивания показало, что клей, содержащий материал ЦТБС-3, характеризуется более высокими значениями плотности, равными (2,438±0,042) г/см<sup>3</sup>, чем клей, содержащий материал ЦТСтБС-2. Его плотность равна (2,277±0,093) г/см<sup>3</sup>.

Таблица 2

Физико-механические и термомеханическая характеристики клея ДМ-5-65 с наполнителями

Тип наполнителя	Модуль упругости, ГПа	Напряжение при разрыве, МПа	Удлинение при разрыве, %	Температура стеклования, °С
ЦТСтБС-2	5278±136	50,67±4,43	1,31±0,24	+83,5
ЦТБС-3	5150±360	47,96±4,44	1,91±0,46	+82,0

Механические свойства и термомеханическая характеристика образцов в форме лопаток [2] клея ДМ-5-65, отвержденного при +60°C в течение 48 часов и содержащего наполнители двух типов, представлены в табл. 2. Следует отметить, что при близости представленных в таблице 2 характеристик, клей с наполнителем ЦТСтБС-2 несколько прочнее клея с наполнителем ЦТБС-3, и имеет более высокую температуру стеклования.

### Заключение

Совокупность экспериментальных результатов комплексного исследования влияния химической природы пьезокерамических материалов ЦТСтБС-2 и ЦТБС-3 на физические и механические характеристики эпоксидного клея ДМ-5-65

свидетельствует о целесообразности введения в рецептуру клея в качестве наполнителя материала ЦТСтБС-2. Присутствие наполнителя ЦТСтБС-2 существенно снижает свободную энергию поверхности образуемых клеевых соединений, облегчает смачивание клеем субстрата (как полярной, так и дисперсионной природы) при сохранении требуемых значений термических и механических характеристик клея. С этих позиций использование клея ДМ-5-65, содержащего в качестве наполнителя материал ЦТСтБС-2, для соединения пьезокерамических элементов электроакустического преобразователя, изготовленных из пьезокерамики ЦТСтБС-2, представляется обоснованным и перспективным.

### Литература

1. Баранец И.В., Ваганов Г.В., Гайдукова Л.В. и др. Исследование влияния наполнителей на структуру и физико-механические характеристики эпоксидного клея ДМ-5-65 / МИТ. № 4(46). Т. 1. 2019. – С. 172-177.
2. Ветров А.С., Краснов А.В., Легуша Ф.Ф. и др. Исследование влияния наполнителей эпоксидного клея ДМ-5-65 на электрофизические характеристики составного электроакустического преобразователя / МИТ. № 4(46). Т. 1. 2019. – С. 178-181.
3. Пантелеев В.Г., Егорова О.В., Клыкова Е.И. Компьютерная микроскопия. – М.: Техносфера. 2005. – 304 с.
4. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир. 1979. – 568 с.
5. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия. 1976. – 232 с.
6. Zenkiewicz M. Methods for the calculation of surface free energy of solids. J. Achiev in Mater. and Manufact. Eng. 2007, V. 24, № 1, p. 137-145.
7. Аблеев Р.И., Баранец И.В., Курлянд С.К. Методы идентификации структурно-морфологической и фазовой организации в трехкомпонентных полимерных системах. Сб. тез. VI Всерос. Каргинской конф. «Полимеры – 2014». – М.: 2014. – С. 663.
8. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. – М.: Высшая школа. 2004. – 434 с.

### References

1. Baranets I.V., Vaganov G.V., Gajdukova L.V. i dr. Issledovanie vliyaniya napolnitelej na strukturu i fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki ehpoksidnogo kleya DM-5-65. [Study of the effect of fillers on the structure and physico-mechanical properties of epoxy glue DM-5-65] MIT. № 4(46). T. 1. 2019. S. 172-177.
2. Vetrov A.S., Krasnov A.V., Legusha F.F. i dr. Issledovanie vliyaniya napolnitelej ehpoksidnogo kleya DM-5-65 na ehlektrofizicheskie kharakteristiki sostavnogo ehlektroakusticheskogo preobrazovatelya. [Investigation of the influence of epoxy fillers effect of DM-5-65 on electrophysical characteristics composite electroacoustic transducer] MIT. № 4(46). T. 1. 2019. S. 178-181.

- Pantelev V.G., Egorova O.V., Klykova E.I. Komp'yuternaya mikroskopiya. [Computer microscopy] M.: Tekhnosfera. 2005. 304 s.
- Adamson A. Fizicheskaya khimiya poverkhnostej. [Physical chemistry of surfaces] M.: Mir. 1979. 568 s.
- Summ B.D., Goryunov YU.V. Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya. [Physical and chemical bases of wetting and spreading] M.: KХimiya. 1976. 232 s.
- Zenkiewicz M. Methods for the calculation of surface free energy of solids. J. Achiev in Mater. and Manufact. Eng. 2007, V. 24, № 1, p. 137-145.
- Ableev R.I., Baranets I.V., Kurlyand S.K. Metody identifikatsii strukturno-morfologicheskoy i fazovoy organizatsii v trekhkomponentnykh polimernykh sistemakh. [Methods of identification of structural-morphological and phase organization in three-component polymer systems] Sb. tez. VI Vseros. Karginsoj konf. «Polimery – 2014». M.: 2014. S. 663.
- SHHukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. Kolloidnaya khimiya. [Colloid chemistry] M.: Vysshaya shkola. 2004. 434 s.

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

**Ирина Владимировна Баранец**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт синтетического каучука, 198035, Санкт-Петербург, ул. Гапсальская, 1, e-mail: baranets@mail.ru

**Глеб Вячеславович Ваганов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Институт высокомолекулярных соединений РАН. 199004, Санкт-Петербург, Большой проспект В.О., 31. e-mail: glebvaganov@mail.ru

**Людмила Викторовна Гайдукова**, научный сотрудник, Научно-исследовательский институт синтетического каучука, 198035, Санкт-Петербург, ул. Гапсальская, 1, e-mail: 9111149627@mail.ru

**Алексей Владимирович Краснов**, заместитель начальника отдела, Концерн «МПО-Гидроприбор», 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24, e-mail: clepto@inbox.ru

**Федор Федорович Легуша**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: legusha@smtu.ru

**Герман Анатольевич Никитин**, инженер-технолог 1 категории, Концерн «МПО-Гидроприбор», 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24, e-mail: nikitin\_german@mail.ru

**Сергей Иванович Пугачев**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Концерн «МПО-Гидроприбор», 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24, e-mail: spugachev@bk.ru

**Евгений Юрьевич Рытов**, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: physics\_spbmtu@mail.ru

**Irina V. Baranets**, Ph.D. (Eng), the leading Researcher, Research Institute of synthetic caoutchouc, Gapsalskaya, 1, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: baranets@mail.ru

**Gleb V.Vaganov**, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Institute of Molecular Compounds of the Russian Academy of Sciences, Bolshoy pr. V.O., 31, St. Petersburg, 199004, Russian Federation, e-mail: glebvaganov@mail.ru

**Ludmila V. Gaydukova**, Research Officer, Research Institute of synthetic caoutchouc, Gapsalskaya, 1, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: 9111149627@mail.ru

**Aleksey V. Krasnov**, the Head of Department, Concern «SUW – Hidropribor», Bolshoj Sampsonievskij, 24, St. Petersburg, 194044, Russian Federation, e-mail: clepto@rambler.ru

**Fedor F. Legusha**, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, the chief of department of physics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: legusha@smtu.ru

**German A. Nikitin**, Engineer, Concern «SUW – Hidropribor», Bolshoj Sampsonievskij, 24, St. Petersburg, 194044, Russian Federation, e-mail: nikitin\_german@mail.ru

**Sergey I. Pugachev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, the leading Researcher, Concern «SUW – Hidropribor», Bolshoj Sampsonievskij, 24, St. Petersburg, 194044, Russian Federation, e-mail: spugachev@bk.ru

**Evgeny Yu. Rytov**, Ph.D. (Eng), the associate professor of department of physics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: physics\_spbmtu@mail.ru

Поступила в редакцию: 27.11.2020

Принята к публикации: 12.01.2021

УДК 681.5

DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.034

## Определение сложности алгоритма динамических характеристик управляемого процесса морского объекта

А.С. Соболев<sup>1</sup> e-mail: sobolev.alexandr1496@gmail.com, П.А. Ерофеев<sup>1</sup> e-mail: pavel.erofeev.95@mail.ru,

А.А. Яшонков<sup>1</sup> e-mail: jashonkov@rambler.ru, А.Л. Фалько<sup>1</sup> e-mail: falkoas@rambler.ru,

И.Р. Епифанцев<sup>2</sup> e-mail: marine\_electronics@corp.smtu.ru

<sup>1</sup>Керченский государственный морской технологический университет, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Аннотация:** Своевременность решений характеризуется соотношением динамических характеристик управляемого процесса и расходов времени на принятие решения. Для получения такого соотношения сначала обоснуем утверждение: время принятия решения системой с нелинейной решающей функцией равняется времени принятия решений системой с линейной решающей функцией, если соответствующие алгоритмы имеют одинаковую сложность. При изучении организационных объектов важно выделять класс целенаправленных или целеустремленных систем. В этом классе, в свою очередь, можно выделить системы, в которых цели задаются извне (обычно это имеет место в закрытых системах), и системы, в которых цели формируются внутри системы (что характерно для открытых, самоорганизующихся систем). Целеустремленные системы являются системами с явно выраженными целевыми устремлениями по достижению цели. Как правило это системы управления движущимися морскими объектами: судами и кораблями в условиях информационно-сложных ситуациях и деятельность таких систем нацелена на результат, а результат может быть достигнут если есть обратная связь. Цель исследований: проведение интроспективного анализа и синтеза целеустремленных систем в условиях информационно – сложной ситуации. Методы исследований – интроспективный анализ и синтез целеустремленных систем. При этом подходе возможно решение принципиальных проблем разработки информационной системы (ИС) методом выделения инвариантных блоков, реализация которых позволяет рассматривать структуру ИС как набор однотипных элементов и возможность построения управляемых объектов. Важной особенностью ИС является обеспечение возможности описания метода организации данных и алгоритмов оперирования данными в терминах используемого информационного языка. Целью данной работы является не перечисление или выбор возможных инвариантных блоков, (этот выбор зависит от характера решаемых задач системой и от свойств управляемых объектов), а построение такой модели блоков ИС и их описания на языке, понятном человеку и машине, которая позволяет создать набор алгоритмов и программ, обслуживающих систему, независимых от содержания блоков конкретных ИС.

**Ключевые слова:** сложный алгоритм, динамические характеристики, управляемый процесс, морской объект

## Determination of the complexity of the algorithm for the dynamic characteristics of the controlled process of the marine object

Alexandr S. Sobolev<sup>1</sup> e-mail: sobolev.alexandr1496@gmail.com,

Pavel A. Erofeev<sup>1</sup> e-mail: pavel.erofeev.95@mail.ru, Alexander A. Yashonkov<sup>1</sup> e-mail: jashonkov@rambler.ru,

Alexander L. Falco<sup>1</sup> e-mail: falkoas@rambler.ru, Ignat R. Epifantsev<sup>2</sup> e-mail: marine\_electronics@corp.smtu.ru

<sup>1</sup>Kerch state maritime technological University, Kerch, Russian Federation, <sup>2</sup>St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Timeliness of decisions is characterized by the ratio of the dynamic characteristics of the controlled process and the time spent on making a decision. To obtain such a relation, we first substantiate the statement: the decision time by a system with a nonlinear decision function is equal to the decision time by a system with a linear decision function, if the corresponding algorithms have the same complexity. When studying organizational objects, it is important to distinguish a class of purposeful or purposeful systems. In this class, in turn, it is possible to distinguish systems in which goals are set from the outside (usually this is the case in closed systems), and systems in which goals are formed within the system (which is typical for open, self-organizing systems). Purposeful systems are systems with clearly expressed purposeful aspirations to achieve a goal. As a rule, these are control systems for moving marine objects: ships and ships in information-complex situations and the activity of such systems is aimed at the result, and the result can be achieved if there is feedback. difficult situation. Research methods - introspective analysis and synthesis of purposeful systems. With this approach, it is possible to solve the fundamental problems of developing an information system (IS) by the method of identifying invariant blocks, the implementation of which allows us to consider the IS structure as a set of elements of the same type and the possibility of constructing controlled objects. An important feature of the IS is the ability to describe the method of organizing data and algorithms for operating with data in terms of the information language used. The purpose of this work is not to enumerate or select possible invariant blocks (this choice depends on the nature of the tasks being solved by the system and on the properties of controlled objects), but to build such a model of IS blocks and their description in a language understandable to humans and machines, which allows creating a set of algorithms and programs serving the system that do not depend on the contents of specific IS blocks.

**Keywords:** complex algorithm, the dynamic characteristics of the controlled process, marine object

**Введение**

Своевременность решений характеризуется соотношением динамических характеристик управляемого процесса и расходов времени на принятие решения. Для получения такого соотношения сначала обоснуем утверждение: время принятия решения системой с нелинейной решающей функцией равняется времени принятия решений системой с линейной решающей функцией, если соответствующие алгоритмы имеют одинаковую сложность.

**Актуальность исследований. Постановка проблемы**

Цель исследований. Для проведения исследований необходимо определить своевременность и достоверность алгоритма динамических характеристик управляемого процесса морского объекта.

Методы исследований основываются на линеаризации системы при анализе своевременности решений.

Результаты исследований. Утверждение основывается на рассуждении, что сложность алгоритма определяется количеством элементарных действий, необходимых для получения результата. Поскольку среднее время выполнения элементарных действий не зависит от содержания алгоритма (время принятия решений за этим алгоритмом) не зависит от вида решенной функции. Выдвинутое утверждение является основой линеаризации системы при анализе своевременности решений.

Линеаризованные системы с сосредоточенными параметрами задержки описываются передаточными функциями

системы управления. Основная функция блока – выделение из искаженного сигнала необходимых для его анализа гармонических составляющих, определения их параметров, и использования результатов этого анализа в управлении средствами повышения значений показателей качества электроэнергии СЭС. При этом регулируются такие показатели, как уровни целевых гармоник токов и напряжений, значения суммарных гармонических искажений, показателей мощности искажений, реактивной мощности и т.д.

$$W_3(p) = Se^{-p\tau}, \tag{1}$$

где  $\tau$  - время принятия решения;  $S$  – чувствительность решения к входным данным.

В дискретных системах одним из самых существенных есть вопрос синхронизации процессов в агрегатах, которые взаимодействуют. В синхронных системах для этого в модели отображают количество тактов, которое тратится на функционирование агрегатов. Чаще всего такие модели изображаются часовыми диаграммами.

Рассмотрим два подхода к синхронизации двух потоков решений. Соответствующие схемы изображены на рис. 1.

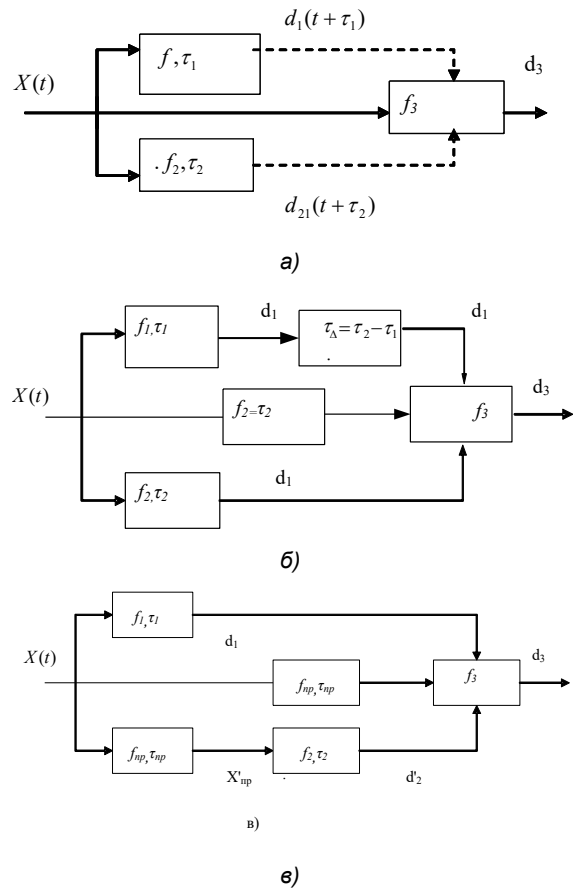


Рис. 1. Схемы синхронизации потоков решений

В динамических системах, где  $X(t)$  - непрерывный процесс, решения  $d1$  и  $d2$  принимаются постоянно и образуют потоки, в которых каждое решение отвечает определенному моменту поступления входных данных.

Схема на рис.1. а) характеризует базовую ситуацию когда решение  $d3$  принимается на основе входных данных  $\{x, d1, d2\}$ , какие отвечают разным моментам времени. Схема на рис. 1. б) приводит все входные данные подсистемы  $f3$  к одному моменту времени путем задержек тех процессов, на формирование которых в системе тратятся менее времени. Общая задержка решения в такой системе  $\tau = \tau_3 + \max\{\tau_1, \tau_2\}$ . (2)

Схема на рис 1. в) предусматривает прогнозирование входных данных  $X(t)$  на такой интервал времени, что с учетом времени следующего принятия решения результаты будут получены одновременно. Общая задержка решений в такой системе  $\tau = \tau_3 + \min\{\tau_1, \tau_2\}$ . (3)

Уменьшение задержки здесь достигается за счет ускорения достоверности решения.

В случае линейной зависимости времени передача данных от количества параметров, которая передается, и экспоненциальной зависимости времени работы алгоритма потоков решений (ПР) общее время ПР приведено на рис. 2



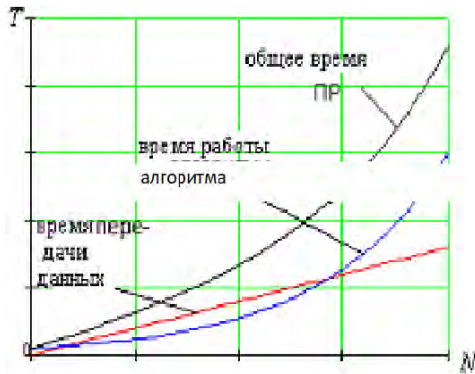


Рис. 2. Зависимость времени потоков решений от количества параметров

Очевидно, что при определенном количестве параметров сложность алгоритма ПР резко вырастет, потому в модели ПР целесообразно использовать количество параметров, которое не приводит к "проклятию размерности".

Достоверность принятого решения определяется несколькими основными факторами:

- правильность разрешимой функции (алгоритму принятия решения);
- достоверность начальных данных для принятия решения;
- время принятия решения по сравнению с динамикой управляемого процесса.

В условиях комбинированной неопределенности достоверность характеризуется функционалом

$$V = \int_{D^+} \beta(d^*) dd^* \tag{4}$$

где  $D^+$  - пространство "хороших" решений в соответствии рис. 3.

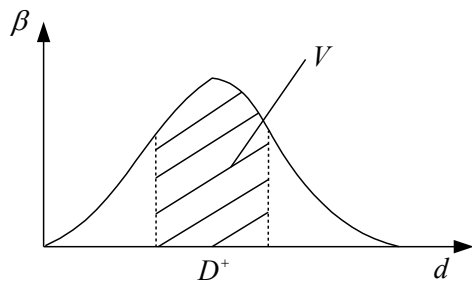


Рис. 3. Достоверность решения

Заштрихованная область на рисунке отображает область "хороших" решений, на которой ищется достоверность решений. Для «хороших» решений достоверность вычисляется на пространстве выходных данных. Если получено решение  $d_0$  при входных данных  $X_0$ , то достоверность

$$V = \int_{F^{-1}(D^+)} dB[F^{-1}(d_0)] \tag{5}$$

где  $F^{-1}$  - обратная решающая функция. Решения найдем с помощью операторного метода

$$\beta_D(d) = \Phi[F] \cdot \beta_Y(y) \tag{6}$$

Поскольку принятие решения занимает промежуток времени  $\tau_{np}$  то начальные данные

зависят от плотности связи между данными, какие использованные для принятия решения  $Y$ , и данными, которые характеризуют состояние управляемого объекта на момент реализации решения  $Y_0$ . Охарактеризуем эту связь условной  $\beta_Y(y/y_0)$ .

В соответствии с операторным методом условную подадим в виде:

$$\beta_D(y/y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \beta_D(y_0) \delta \left[ y - r_{Y_0}(\tau) \sqrt{\frac{D_Y}{D_{Y_0}}} (y_0 - m_{y_0}) - \sqrt{1 - r_{Y_0}^2(\tau)} (y - m_Y) - m_Y \right] d_{y_0}.$$

Учитывая, что  $Y, Y_0$  - разные разрезы одного процесса, то при условии стационарности

$$m_Y = m_{Y_0}, D_Y = D_{Y_0}, r_{YY_0} = r_Y.$$

Следовательно

$$\beta_D(y/y_0) = \frac{1}{\sqrt{1-r_Y^2}} \beta_Y \left[ \frac{y}{\sqrt{1-r_Y^2}} - \frac{r_Y}{\sqrt{1-r_Y^2}} \cdot (y_0 - m_Y) - \frac{1-\sqrt{1-r_Y^2}}{\sqrt{1-r_Y^2}} m_Y \right].$$

Таким образом, с учетом времени принятия решения выражение (2) будет иметь вид

$$\beta_D(d) = \Phi(F) \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-r_Y^2(\tau_{np})}} \cdot \beta_Y \left[ \frac{y}{\sqrt{1-r_Y^2(\tau_{np})}} - \frac{r_Y^2(\tau_{np})}{\sqrt{1-r_Y^2}} \cdot (y_0 - m_Y) - \frac{1-\sqrt{1-r_Y^2}}{\sqrt{1-r_Y^2}} m_Y \right] \right\} \tag{7}$$

График зависимости достоверности (7) от времени принятия решения с учетом (6) для экспоненциальной корреляционной функции  $r_Y(\tau_{np})$  приведен на рис. 4. Достоверность принятого решения зависит от степени [11, 12, 13] неопределенности ситуации принятия решения.

Если система поддержки принятия решений построена рационально, то при линейные решающей функции  $F$  для принятия решения получают в первую очередь информацию относительно параметров, к которым решение является наиболее чувствительным [14].

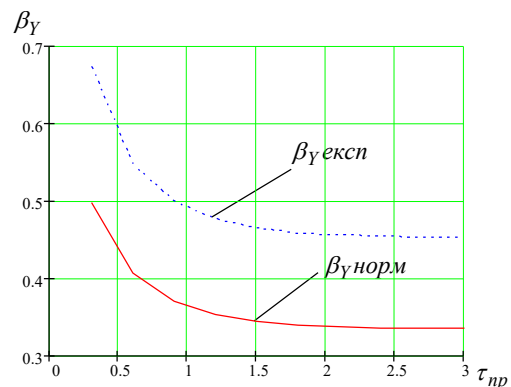


Рис. 4. Влияние времени потоков реализации (ПР) на достоверность решения

При линейной решающей функции  
 $d = F(Y) = \sum_{i=1}^m c_i y_i$  априорная энтропия  
 решения

$$H_{d_{анп}} = \sum_{i=1}^m H_{y_i} + \sum_{i=1}^m \log c_i = H_{анп} + \sum_{i=1}^m \log c_i \quad (8)$$

Апостериорная энтропия решения

$$H_d = H_{анп} - I_y + \sum_{i=k+1}^m \log c_i, \quad (9)$$

где  $k$  - количество контролируемых параметров.

Если коэффициенты  $c_i$  нормируемые  $c_i \in (0, 1]$  то

$$c_{i_{cp}} = \frac{i}{m}, \quad I_{cp} = \frac{I}{k},$$

откуда

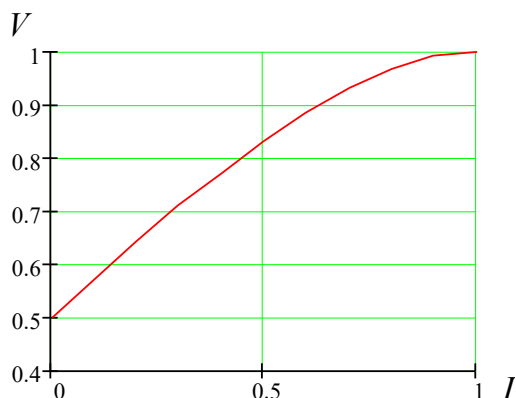
$$H_d = H_{анп} - I + \sum_{i=\frac{I}{I_{cp}}+1}^m \log \frac{i}{m} \quad (10)$$

Остаточная неопределенность условий принятия решения

$$H_{анс} = H_{анп} - I. \quad (11)$$

Учитывая, что достоверность пропорциональна экспоненте от энтропии, построим график зависимости достоверности от количества информации и остаточной неопределенности (рис. 5).

а)



б)

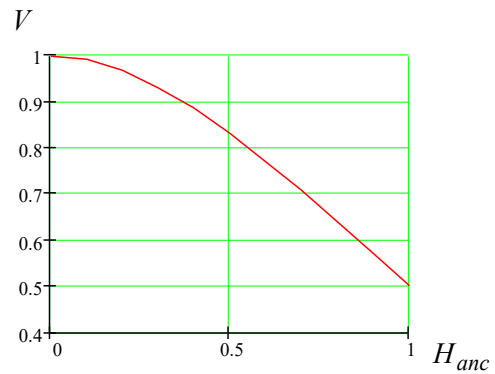


Рис. 5. Зависимость достоверности решения при линейной решающей функции от количества информации(а), энтропии(б)

### Заключение

Таким образом, расчет достоверности и своевременности алгоритма решения позволяет оценить качество решения и могут быть использованы для повышения эффективности управления процессами в динамических системах морского объекта. Энтропия принятия решения является отдельным случаем обобщенного риска, который определяется как первый начальный момент потерь

$$R(d) = \int_G g(d) \beta(g/d) dg,$$

где  $R(d)$  - обобщенный риск;  $g(d)$  - функция потерь. Если функция потерь имеет вид  $g(d) = \log \beta(g/d)$ , то обобщенный риск совпадает с обобщенной энтропией

$$H_d(d) = R(d) = \int_G \beta(g/d) \log \beta(g/d) dg.$$

Обобщенная энтропия в этом случае является мерой неопределенности потерь от принятого решения.

### Литература

1. Авраменко В.П. Управление производством в условиях неопределенности: Монография. – К.: НВК ВО, 1992. – 48 с.
2. Автоматизация управления предприятием / Баранов В.В. и др. - М.: ИНФА М, 2000. - 239 с.
3. Автоматизированные системы управления предприятиями / В.Н. Четвериков, Г.Н. Воробьев, Г.И. Казаков и др. - М.: Высшая школа, 1979. - 303 с.
4. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
5. Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем: Монография. – М.: Радио и Связь, 1985. – 328 с.
6. Бочарников В.П., Свешников С.В., Возняк С.Н. Прогнозные коммерческие расчеты и анализ рисков на Fuzzy for Excel: Монография. – К.: ИНЭКС, 2000. – 250 с.

7. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. - М.: Наука, 1987. - 400 с.
8. Dang, B., & Zhilenkov, A. (2018). Finite precision modeling of radar digital chaotic systems with dynamical properties analysis. *AIP Conference Proceedings*, 2034 , 020007. doi: 10.1063/1.5067350
9. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных // Пер. с англ. - К.: Диалектика, 1998. - 784 с.
10. Иваненко В.И., Лабковский В.А. Проблема неопределенности в задачах принятия решений. / АН УССР, Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова - К.: Наукова думка, 1990. – 132
11. Zhilenkov, A., & Chernyi, S. (2019). Models and algorithms of the positioning and trajectory stabilisation system with elements of structural analysis for robotic applications. *International Journal Of Embedded Systems*, 11(6), 806. doi: 10.1504/ijes.2019.104005
12. Sergei, C., Aleksei, V., Pavel, E., & Bogdan, N. (2020). Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime Systems. *Procedia Computer Science*, 167, 2164-2171. doi: 10.1016/j.procs.2020.03.266
13. Wang, W., Zhang, B., Wu, K., Chepinskiy, S., Zhilenkov, A., Chernyi, S., & Krasnov, A. (2021). A visual terrain classification method for mobile robots' navigation based on convolutional neural network and support vector machine. *Transactions Of The Institute Of Measurement And Control*, 014233122098791. doi: 10.1177/0142331220987917
14. Chernyi, S., Erofeev, P., Novak, B., & Emelianov, V. (2021). Investigation of the Mechanical and Electromechanical Starting Characteristics of an Asynchronous Electric Drive of a Two-Piston Marine Compressor. *Journal Of Marine Science And Engineering*, 9(2), 207. doi: 10.3390/jmse9020207

#### References

1. Avramenko V.P. Upravlenie proizvodstvom v usloviyah neopredelennosti: Monografiya. [Manufacturing management under uncertainty: monograph] – К.: NVK VO, 1992. – 48 s.
2. Avtomatizacija upravlenija predpriyatiem [Automation of enterprise management] / Baranov V.V. i dr. - М.: INFA M, 2000. - 239 s.
3. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija predpriyatijami [Automated enterprise management systems] / V.N. Chetverikov, G.N. Vorob'ev, G.I. Kazakov i dr. - М.: Vysshaja shkola, 1979. - 303 s.
4. Altunin A.E., Semuhin M.V. Modeli i algoritmy prinjatija reshenij v nechetkih uslovijah: Monografiya. [Models and algorithms for decision making in fuzzy conditions: monograph] – Tjumen': Izd-vo Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2000. – 352 s.
5. Balashov E.P. Jevoljucionnyj sintez sistem: Monografiya. [Evolutionary synthesis of systems: monograph] – М.: Radio i Svjaz', 1985. – 328 s.
6. Bocharnikov V.P., Sveshnikov S.V., Voznjak S.N. Prognoznye kommercheskie raschety i analiz riskov na Fuzzy for Excel: Monografiya. [Predictive commercial calculations and risk analysis on Fuzzy for Excel: Monograph] – К.: INJeKS, 2000. – 250 s.
7. Buslenko N.P. Modelirovanie slozhnyh sistem. [Modeling complex systems] - М.: Nauka, 1987. - 400 s.
8. Dang, B., & Zhilenkov, A. Finite precision modeling of radar digital chaotic systems with dynamical properties analysis. *AIP Conference Proceedings*, 2034 , 020007 (2018). doi: 10.1063/1.5067350
9. Dejт K.Dzh. Vvedenie v sistemy baz dannyh [Introduction to Database Systems] // Per. s angl. - К.: Dialektika, 1998. - 784 s.
10. Ivanenko V.I., Labkovskij V.A. Problema neopredelennosti v zadachah prinjatija reshenij. [The problem of uncertainty in decision-making problems] / АН УССР, Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова - К.: Naukova dumka, 1990. – 132
11. Zhilenkov, A., & Chernyi, S. (2019). Models and algorithms of the positioning and trajectory stabilisation system with elements of structural analysis for robotic applications. *International Journal Of Embedded Systems*, 11(6), 806. doi: 10.1504/ijes.2019.104005
12. Sergei, C., Aleksei, V., Pavel, E., & Bogdan, N. (2020). Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime Systems. *Procedia Computer Science*, 167, 2164-2171. doi: 10.1016/j.procs.2020.03.266
13. Wang, W., Zhang, B., Wu, K., Chepinskiy, S., Zhilenkov, A., Chernyi, S., & Krasnov, A. (2021). A visual terrain classification method for mobile robots' navigation based on convolutional neural network and support vector machine. *Transactions Of The Institute Of Measurement And Control*, 014233122098791. doi: 10.1177/0142331220987917
14. Chernyi, S., Erofeev, P., Novak, B., & Emelianov, V. (2021). Investigation of the Mechanical and Electromechanical Starting Characteristics of an Asynchronous Electric Drive of a Two-Piston Marine Compressor. *Journal Of Marine Science And Engineering*, 9(2), 207. doi: 10.3390/jmse9020207

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Сергеевич Соболев**, магистрант кафедры машин и аппаратов пищевых производств Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail: sobolev.alexandr1496@gmail.com

**Alexandr S. Sobolev**, undergraduate student of Department of machines and apparatuses of food production Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., e-mail: sobolev.alexandr1496@gmail.com

**Павел Андреевич Ерофеев**, аспирант кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail: pavel.erofeev.95@mail.ru

**Erofeev P. Andreevich**, graduate student of the Department of Electrical Equipment of Ships and Automation of Production, Kerch State Marine Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, st. Ordzhonikidze, 82, e-mail: pavel.erofeev.95@mail.ru

**Александр Анатольевич Яшонков**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 e-mail: jashonkov@rambler.ru

**Alexander A. Yashonkov**, Ph.D. (Eng.), head of Department of machines and apparatuses of food production, Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82, e-mail: jashonkov@rambler.ru

**Александр Леонидович Фалько**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств Керченский государственный морской технологический университет, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82. e-mail: falkoas@rambler.ru

**Alexander L. Falko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Associate professor of the Department of machines and apparatuses of food production Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 falkoas@rambler.ru

**Игнат Романович Епифанцев**, аспирант, ассистент кафедры киберфизических систем Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 198303, г. Санкт-Петербург, ул. Ленинский проспект, 101. e-mail: marine\_electronics@corp.smtu.ru

**Ignat R. Epifantsev**, graduate student of the Department of Cyber-Physical Systems St. Petersburg State Marine Technical University, 198303, St. Petersburg, st. Leninsky Prospect, 101. e-mail: marine\_electronics@corp.smtu.ru

Поступила в редакцию: 16.10.2020

Принята к публикации: 12.02.2021





Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE  
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173  
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3  
e-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto: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 редколлекцией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлекция не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставяемому по запросу счету.**

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала  
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

**д.т.н. проф. Никитин Н.В.**

**Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ**

**Гайкович А.И.**

**Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

**Архипов А.В., Рыбников Н.И.**

**Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

**Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

**Шауб П.А.**

**Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

**Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

**Гайкович А.И.**

**Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**