

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

ISSN 2073-7173 (print) 011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101

ISSN 2588-0233 (on line) 1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100

00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101

110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010

00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001

11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100

001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



№ 2 (48) Т.2 2020
2 PART 2 2020



Труды
Санкт-Петербургского
государственного морского технического университета



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 том 2 2020 Сквозной номер 48

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 из раздела «для авторов». Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте www.morintex.ru в открытом доступе. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в 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 в 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)

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.

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

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»

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 part 2 2020 www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

- 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 — 4 issues per year

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

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

Founder-Publisher: Research Centre “Marine Intelligent Technologies”.

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 of 19.09.2008

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

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”

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



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 том 2 2020 (Сквозной номер 48)

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, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ, 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.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 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 автоматизации, Санкт-Петербургский государственный морской

технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 part 2 2020 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, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy, 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.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



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.





ТРУДЫ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

СОДЕРЖАНИЕ

стр

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях судов на основании трехмерной потенциальной теории.....	11
Сеньков А.П., Кузнецов В.И., Никущенко Д.В., Фрумен А.И. Повышение надежности гребных установок с изменяющимся направлением тяги гребного винта для судов ледового класса.....	19
Павловский В.А., Никущенко Д.В. Связь между динамической и объемной вязкостями жидкости...	24
Яковлев А.Ю., Тхант Зин Метод учета масштабного эффекта для осесимметричных тел при продольном обтекании.....	28

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Плотников К.В. Нормативно-методические основы проектирования поперечных танкерных рам в грузовой части современных крупнотоннажных нефтеналивных судов.....	35
Юй Синьянь. Архитектурно-конструктивные особенности крупнотоннажных контейнерных судов....	45
Алексеев А.В. Модель инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники	53
Гайкович А.И., Родионов А.А., Вай Ян Вин Хтве Проектная оценка прочностной безопасности судна при столкновении.....	61

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Пискунова С.В., Нифонтов Ю.А. Разработка технико-технологических решений по вторичному использованию буровых шламов на морских платформах арктического региона.....	65
Зубарев Ю.М., Круглов А.И., Афанасенков М.А. Применение методов ионно-вакуумной модификации рабочих поверхностей твердосплавных инструментов для повышения их работоспособности.....	71
Грибанькова А.А., Агиевич М.А., Евтуховская О.А., Гурченко В.В., Чжай С., Дуань Ц., Хоу Б. Исследование влияния гидрокоричной (3-фенилпропановой) кислоты на процесс микробиологической коррозии стали.....	76

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Боярчик В.О., Михлин В.Г., Румянцев А.А., Урусов Р.А. Тенденции развития забортных пусковых установок для запуска необитаемых подводных аппаратов и образцов морского подводного оружия с подводных носителей (по материалам открытых публикаций).....	81
Вахрушев К.С., Дементьев В.Б., Пушкарев А.Э., Блинков А.П. Анализ способов изготовления разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей и выбор инструмента для его реализации.....	87
Павловский В.А. Анализ установившегося течения в круговой цилиндрической трубе с гидравлически гладкими стенками.....	93
Минасян М.А., Цзэн Цзюньцзе, Минасян А.М. Подготовка обоснованных исходных данных для аналитических и экспериментальных исследований крутильных колебаний универсальной дизель – генераторной установки ДГ-8,83.....	99
Медведев В.В., Голубев Р.О. Анализ степени снижения конструктивного коэффициента энергетической эффективности судов гражданского флота при применении утилизационных паротурбинных установок.....	107

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Чебан Е.Ю., Никущенко Д.В., Мартемьянова О.В., Зотова Н.Е. Исследование поля скоростей в кильватерном следе за счаленными судами.....	115
Синякова М.А., Бронникова Л.В., Бронникова Н.И. Анализ влияния деятельности промышленных предприятий на состояние воды Ладожского озера.....	120

Шарфарец Б.П., Легуша Ф.Ф. Реализация приемной акустической антенны с помощью электрокинетического явления потенциал течения. Электрохимический аспект..... 126

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Кузьменко А.В. Идентификация подводных объектов по оптическому изображению..... 131

Игнатьева Н.В., Голубев И.К., Смольский Д.А. Обработка и анализ подводных спектрональных изображений..... 137

Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Определение порогов селекции по уровню и длительности в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом..... 144

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Зубарев Ю.М., Черненко В.И., Приемышев А.В. Разработка рациональных рабочих циклов с целью повышения эффективности процесса шлифования..... 148

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Герко А.Г.К. Методические подходы к созданию экотехнопарка на примере Санкт-Петербурга..... 155

Бронникова Г.А., Бронникова Л.В. Экономическое обоснование затрат на мероприятия по улучшению условий и обеспечению безопасности труда..... 161

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Рождественский К.В. Динамика и акустика кавитационного пузырька при возрастании внешнего давления..... 166

Маламанов С.Ю., Павловский В.А. Генерация электромагнитного поля в проводящей среде, вызванная колебаниями заряженного тела..... 174

CONTENTS	page
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev The determination of nonlinear forces of the second order during the ship's swaying and rolling, based on the three-dimensional potential theory.....	11
Aleksey P. Sen'kov, Viktor I. Kuznetsov, Dmitriy V. Nikushchenko, Aleksandr I. Frumen. Improving the reliability of propulsion systems with a varying propeller thrust for ice-class vessels.....	19
Valery A. Pavlovsky, Dmitry V. Nikushchenko Relation between dynamic and bulk viscosities.....	24
Aleksey Yu. Yakovlev, Thant Zin Scale effect evaluation method of axisymmetric body in longitudinal flow.....	28
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Kirill V. Plotnikov Normative and methodological principles for transverse webs structural design as applicable to cargo tank area of double-hull oil tankers.....	35
Xinyan Yu Architectural and structural peculiarities of large tonnage container vessels.....	45
Anatoly V. Alekseev. Model for invariant assessment of quality and efficiency for research design of marine engineering facilities.....	53
Alexander I. Gaykovich, Alexander A. Rodionov, Wai Yang Win Htwe Design assessment of ship strength safety in case of collision.....	61
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Sofya V. Piskunova, Yuri A. Nifontov Development of the technical and process design details on secondary use of drilling cuttings on marine platforms of the arctic region.....	65
Yuri M. Zubarev., Andrei I. Kruglov , Michail A. Afanasenkov Application of methods of ion-vacuum modification of working surfaces of carbide alloys tools to increase their operational capacity.....	71
Anzhela A. Gribankova, Maria A. Agievich, Olesya A. Evtukhovskaya, Valentin V. Gurchenko, Xiaofan Zhai, Jizhou Duan, Baorong Hou Investigation of the effect of hydrocinnamic (3-phenylpropanoic) acid on the microbiological corrosion of steel.....	76
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Vladislav O. Boyarchik, Valeriy G. Mihlin , Artem A. Rumyantsev, Ruslan A. Urusov Development trends of outboard launchers for unmanned underwater vehicles and marine underwater weapons from underwater carriers (based on materials from open publications).....	81
Konstantin S. Vahrushev, Vyacheslav B. Dementiev, Andrei E. Pushkarev, Alexey P. Blinkov Analysis of methods of manufacturing of differently multi-directional internal twist grooves of tubular body parts and selection of tools for its implementation.....	87
Valery A. Pavlovsky Analysis of steady flow in a circular cylindrical pipe with hydraulically smooth walls	93
Minas A. Minasyan, Junjie Zeng, Armen M. Minasyan, Preparation of reasonable initial data for analytical and experimental studies of torsional vibrations of the universal diesel generator set DG-8.83....	99
Valery V. Medvedev, Roman O. Golubev Analysis of the energy efficiency design index reduction by steam turbine based waste heat recovery systems application for civil vessels.....	107
PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION	
Egor Yu. Cheban, Dmitry V. Nikuschenko, Olga V. Martmianova, Natalia E. Zotova Research of velocity field in vessel's wake current from «side by side» mooring.....	115
Mariia A. Siniakova, Liliya V. Bronnikova, Natalia I. Bronnikova Analysis of the influence of the activities of industrial enterprises on the water state of the Ladoga lake.....	120
Boris P. Sharfarets, Fedor F. Legusha Implementation of a receiving acoustic antenna using an electrokinetic phenomenon of potential flow. Electrochemical aspect.....	126
CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION	
Aleksandr V. Kuzmenko Identification of underwater objects by optical image.....	131

Natalia V. Ignatieva, Ilya K. Golubev, Dmitry A. Smolskiy Processing and analysis of underwater multispectral images..... 137

Stanislav B. Egorov, Roman I. Gorbachev., Determination of level and time thresholds for detectors with normalized indicator process..... 144

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Yuri M. Zubarev, Viktor I. Chernenko, AlexanderV. Priemyshev Development of rational working cycles to improve the efficiency of the grinding process..... 148

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Ainura G.K. Gerko Methodological approaches to creating an ecotechnopark based on the example of saint Petersburg..... 155

Galina A. Bronnikova, Liliya V. Bronnikova Economic justification for the cost of measures to improve conditions and safety of work..... 161

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Kirill V. Rozhdestvensky Dynamics and acoustics of cavitation bubble in adverse external pressure gradient..... 166

Stepan Y. Malamanov, Valery A.Pavlovsky Electromagnetic field generation in a conductive medium caused by charged body vibrations..... 174

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.12.073.243.4

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.021

Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях судов на основании трехмерной потенциальной теории

В.Ю. Семенова¹, Д.А. Альбаев¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается определение нелинейных сил, возникающих при поперечно-горизонтальной и бортовой качке судов на основании трехмерной потенциальной теории. Для их определения необходимо вычисление потенциалов второго порядка малости. Представленное решение в отечественной практике является новым. Решение задачи осуществляется на основании методов малого параметра и интегральных уравнений с учетом нелинейных граничных условий на смоченной поверхности судна и свободной поверхностью жидкости. Нелинейные горизонтальные силы и моменты, возникающие при этих двух видах качки определяются в работе с использованием различных функций Грина: для бесконечно-глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины, когда $H \rightarrow \infty$. Полученные результаты практически полностью согласуются между собой. Приводятся результаты расчетов горизонтальных сил и моментов для четырех разных судов. Расчеты представлены в сравнении с расчетами по двумерной теории, выполненными также для случая бесконечно глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины при больших значениях отношения глубины к осадке H/T . Показано хорошее согласование результатов между собой

Ключевые слова: метод интегральных уравнений, трехмерная потенциальная теория, потенциал второго порядка, функция Грина, бортовая качка, поперечно-горизонтальная качка, нелинейные силы

The determination of nonlinear forces of the second order during the ship's swaying and rolling, based on the three-dimensional potential theory

Viktoriya Yu. Semenova¹, Danil A. Al'baev¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article deals with the definition of nonlinear forces arising in the sway and roll motions of the ships on the basis of three-dimensional potential theory. To determine them, it is necessary to calculate the potentials of the second order of smallness. The presented solution in national practice is new. The solution of the problem is carried out on the basis of small parameter methods and integral equations taking into account nonlinear boundary conditions on the wetted surface of the ship and the free surface of the liquid. Nonlinear horizontal forces and moments are determined in the work using various Green functions: for an infinitely deep fluid and a fluid of limited depth when $H \rightarrow \infty$. The results obtained are completely consistent with each other. The results of calculations of the nonlinear horizontal forces and momenta for four different ships are presented. The calculations are presented in comparison with the calculations according to the two-dimensional theory, also performed for the case of an infinitely deep liquid and liquid of limited depth for large values of the ratio of depth to sediment H/T . Good agreement between the results is shown

Keywords: method of the integral equations, three-dimensional potential theory, the potential of the second order, green function, rolling, swaying, nonlinear forces

Введение

Работы, основанные на использовании двумерной теории [1], [2], [5] показали значительное влияние нелинейных сил и моментов, возникающих при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях. Под действием данных сил появляются супергармонические резонансы бортовой качки, возникающие на частотах в два раза меньших собственной частоты бортовой качки. В работе [2] показано, что в образовании субгармонических резонансов основную роль оказывает нелинейный момент, возникающий при поперечно-горизонтальной качке. Амплитуды поперечно-горизонтальной качки также увеличиваются на 10-15 % под воздействием нелинейных сил по сравнению с результатами, получаемыми по линейной теории.

В продолжении работы авторов [4] в настоящей статье рассматривается определение нелинейных сил и моментов, возникающих при поперечных видах

качки на основании трехмерной потенциальной теории.

Описание метода

Для решения задачи введем два малых параметра $\varepsilon_2 = \frac{\eta g}{B/2}$ и $\varepsilon_4 = \frac{\theta_m}{1rad}$, характеризующих малость поперечно-горизонтальных и бортовых колебаний. Тогда потенциал скорости движения жидкости при поперечно-горизонтальной и бортовой качки с точностью до второго порядка малости будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\Phi_2 &= \varepsilon_2 \Phi_2^{(1)} + \varepsilon_2^2 \Phi_{22_1}^{(2)} + \varepsilon_2^2 \Phi_{22_2}^{(2)}; \\ \Phi_4 &= \varepsilon_4 \Phi_4^{(1)} + \varepsilon_4^2 \Phi_{44_1}^{(2)} + \varepsilon_4^2 \Phi_{44_2}^{(2)}.\end{aligned}\quad (1)$$

Все потенциалы второго порядка должны удовлетворять уравнению Лапласа, принципу излучения и условию на глубине. Получим граничные условия на смоченной и свободной поверхности для

каждого из них, путем подстановки выражений (1) в общие граничные условия.

На смоченной поверхности [8]:

$$\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial n} = Q_B = -n(\bar{X}^{(1)} \cdot \nabla) \nabla \Phi^{(1)} + (V^{(1)} - \nabla \Phi^{(1)}) N^{(1)} + V^{(2)} n + \frac{\partial H}{\partial t} r, \quad (2)$$

где

$$\bar{X}^{(1)} = \begin{Bmatrix} \xi_g^{(1)} + (\psi^{(1)} z - \chi^{(1)} y) \\ \eta_g^{(1)} - (\theta^{(1)} z - \chi^{(1)} x) \\ \zeta_g^{(1)} + (\theta^{(1)} y - \psi^{(1)} x) \end{Bmatrix};$$

$$V^{(1)} = \begin{Bmatrix} \dot{\xi}_g^{(1)} + (\dot{\psi}^{(1)} z - \dot{\chi}^{(1)} y) \\ \dot{\eta}_g^{(1)} - (\dot{\theta}^{(1)} z - \dot{\chi}^{(1)} x) \\ \dot{\zeta}_g^{(1)} + (\dot{\theta}^{(1)} y - \dot{\psi}^{(1)} x) \end{Bmatrix};$$

$$N^{(1)} = \begin{Bmatrix} \psi^{(1)} \cos(n, z) - \chi^{(1)} \cos(n, y) \\ -\theta^{(1)} \cos(n, z) + \chi^{(1)} \cos(n, x) \\ \theta^{(1)} \cos(n, y) - \psi^{(1)} \cos(n, x) \end{Bmatrix}; \quad (3)$$

$$V^{(2)} = \begin{Bmatrix} \xi_g^{(2)} + (\psi^{(2)} z - \dot{\chi}^{(2)} y) \\ \dot{\eta}_g^{(2)} - (\dot{\theta}^{(2)} z - \dot{\chi}^{(2)} x) \\ \dot{\zeta}_g^{(2)} + (\dot{\theta}^{(2)} y - \dot{\psi}^{(2)} x) \end{Bmatrix};$$

$$H = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \psi^2 + \chi^2 & 0 & 0 \\ -2\theta\psi & \theta^2 + \chi^2 & 0 \\ -2\theta\chi & -2\psi\chi & \theta^2 + \psi^2 \end{pmatrix};$$

$$r = (x, y, z).$$

И на свободной поверхности:

$$\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \Phi^{(2)} = Q_F = -\frac{i\omega}{g} (\nabla \Phi^{(1)})^2 + \frac{i\omega}{2g} \Phi^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \right). \quad (4)$$

Группируя составляющие, пропорциональные ε_2^2 и ε_4^2 , получим:

$$\frac{\partial \Phi_{22_1}^{(2)}}{\partial n} = Q_{B22} = -n(\eta_g^{(1)} \cdot \nabla) \nabla \Phi_2^{(1)} = -\frac{i}{2} \eta_g^{(1)} \left[\frac{\partial^2 \Phi_2^{(1)}}{\partial x \partial y} \cos(n, x) + \frac{\partial^2 \Phi_2^{(1)}}{\partial y^2} \cos(n, y) + \frac{\partial^2 \Phi_3^{(1)}}{\partial z \partial y} \cos(n, z) \right]. \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi_{22_1}^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \Phi_{22_1}^{(2)} = Q_{F22} = -\frac{i\omega}{g} \left[\left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{i\omega}{2g} \Phi_2^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \Phi_2^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \right). \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi_{22_2}^{(2)}}{\partial n} = \dot{\eta}_g^{(2)} \cos(n, y). \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Phi_{22_2}^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \Phi_{22_2}^{(2)} = 0. \quad (8)$$

Для потенциалов $\Phi_{44_1}^{(2)}$ и $\Phi_{44_2}^{(2)}$ будем иметь:

$$\frac{\partial \Phi_{44_1}^{(2)}}{\partial n} = Q_{B44} = \frac{i}{2} \theta_m^{(1)} z \left[\frac{\partial^2 \Phi_4^{(1)}}{\partial x \partial y} \cos(n, x) + \frac{\partial^2 \Phi_4^{(1)}}{\partial y^2} \cos(n, y) + \frac{\partial^2 \Phi_4^{(1)}}{\partial z \partial y} \cos(n, z) \right] - \frac{i}{2} \theta_m^{(1)} y \left[\frac{\partial^2 \Phi_4^{(1)}}{\partial x \partial z} \cos(n, x) + \frac{\partial^2 \Phi_4^{(1)}}{\partial y \partial z} \cos(n, y) + \frac{\partial^2 \Phi_4^{(1)}}{\partial z^2} \cos(n, z) \right]. \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Phi_{44_1}^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \Phi_{44_1}^{(2)} = Q_{F44} = -\frac{i\omega}{g} \left[\left(\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{i\omega}{2g} \Phi_4^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \Phi_4^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} \right). \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Phi_{44_2}^{(2)}}{\partial n} = \theta_m^{(2)} (y \cos(n, z) - z \cos(n, y)) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Phi_{44_2}^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \Phi_{44_2}^{(2)} = 0. \quad (12)$$

Задача определения потенциалов $\Phi_{22_2}^{(2)}$ и $\Phi_{44_2}^{(2)}$ решена в работе авторов [3].

В настоящей работе будет рассмотрено определение потенциалов $\Phi_{22_1}^{(2)}$ и $\Phi_{44_1}^{(2)}$.

Для определения данных потенциалов используется, как и в случае вертикальной качки, метод интегральных уравнений [4], согласно которому:

$$-\frac{1}{2} \Phi_{22_1}^{(2)}(x, y, z) + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \Phi_{22_1}^{(2)}(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n} d\Omega = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} Q_{B22} G^{(2)} d\Omega + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_F} Q_{F22} G^{(2)} dS_F; \quad (13)$$

$$-\frac{1}{2} \Phi_{44_1}^{(2)}(x, y, z) + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \Phi_{44_1}^{(2)}(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n} d\Omega = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} Q_{B44} G^{(2)} d\Omega + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_F} Q_{F44} G^{(2)} dS_F$$

Функция Грина $G^{(2)}$ может быть определена по одной из формул для бесконечно-глубокой жидкости:

$$G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 8v \int_0^{\infty} \frac{e^{k(z+\zeta)}}{k - 4v} J_0(kR) dk + i8\pi v e^{4v(z+\zeta)} J_0(4vR). \quad (14)$$

Для жидкости ограниченной глубины:

$$G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \int_0^\infty \frac{2(k + 4\nu)e^{-kh} \cosh k(z+h)}{k \sinh kh - 4\nu \cosh kh} \cdot \cosh k(\zeta+h) J_0(kR) dk + + i2\pi \frac{2((4\mu_0)^2 - (4\nu)^2) \cosh 4\mu_0(z+h)}{((4\mu_0)^2 - (4\nu)^2)h + 4\nu} \cdot \cosh 4\mu_0(\zeta+h) J_0(\mu_0 R). \quad (15)$$

Здесь
 $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$;
 $r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2}$;
 $R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$;
 $\nu = \frac{\omega^2}{g}$ – волновое число;
 μ_0 – положительный корень трансцендентного уравнения, имеющего вид: $\mu_0 \tanh(\mu_0 H) = \nu$
 J_0 – функция Бесселя.

В работе авторов [4] было показано на примере вертикальной качки, что основные трудности решения задачи возникают при определении вторых производных, входящих в граничные условия на смоченной и свободной поверхности. Благодаря использованию векторных преобразований, теоремы Стокса и теоремы Гаусса [6], [7] вычисления данных производных можно избежать вообще и получить следующие выражений входящие в правые части уравнения (13).

$$\iint_{\Omega} Q_{B22} G^{(2)} d\Omega = \iint_{\Omega} n \left[(\eta_g^{(1)} \cdot \nabla) \nabla \Phi_2^{(1)} \right] G^{(2)} d\Omega = = \eta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial y} + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial z} \right] \cos(n, z) d\Omega - - \eta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \frac{d\Phi_2^{(1)}}{dn} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial z} d\Omega + + \eta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} s_z - \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} s_x \right] G^{(2)} dl. \quad (16)$$

Для потенциала бортовой качки:

$$\iint_{\Omega} Q_{B44} G^{(2)} d\Omega = = \theta_m^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial y} + \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial z} \right] (y \cos(n, z) - z \cos(n, y)) d\Omega - - \theta_m^{(1)} \iint_{\Omega} \frac{d\Phi_4^{(1)}}{dn} \left(\frac{\partial G^{(2)}}{\partial z} y - \frac{\partial G^{(2)}}{\partial y} z \right) d\Omega + + \theta_m^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} y s_x - \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} y s_y \right] G^{(2)} dl + \quad (17)$$

$$+ \theta_m^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} n_y - \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} n_z \right] G^{(2)} d\Omega,$$

где $s_x = n_y / \sqrt{1 - n_z^2}$, $s_y = -n_x / \sqrt{1 - n_z^2}$, $s_z = 0$.

Граничные условия на свободной поверхности, содержащие вторую производную, можно представить аналогично вертикальной качке следующим образом:

$$\iint_{S_F} Q_{Fnn} G^{(2)} dS_F = \iint_{S_F} Q_{Fnn_1} G^{(2)} dS_F + + \iint_{S_F} Q_{Fnn_2} G^{(2)} dS_F; \quad (18)$$

$$Q_{Fnn_1} = = -\frac{i\omega}{g} \left[\left(\frac{\partial \Phi_n^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_n^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_n^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right] + + \frac{i\omega}{2g} \Phi_n^{(1)} \left(-\frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_n^{(1)}}{\partial z} \right);$$

$$Q_{Fnn_2} = \frac{i\omega}{2g} \Phi_n^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_n^{(1)}}{\partial z^2};$$

$$n = 2, 4; \quad nn = 22, 44.$$

Согласно [6], можно получить:

$$\iint_{S_F} \Phi_n^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_n^{(1)}}{\partial z^2} G^{(2)} dS_F = = - \iint_{WL+PC} \Phi_n^{(1)} (\nabla \Phi_n^{(1)} \cdot n) G^{(2)} dl + + \iint_{S_F} (\nabla \Phi_n^{(1)} \nabla \Phi_n^{(1)}) G^{(2)} dS_F + + \iint_{S_F} \Phi_n^{(1)} (\nabla \Phi_n^{(1)} \nabla G^{(2)}) dS_F. \quad (19)$$

В выражении (19) \iint_{WL+PC} берется по контуру ватерлинии судна и по контуру, ограничивающему свободную поверхность жидкости на достаточно большом удалении от судна.

Давление второго порядка, при поперечно-горизонтальной качке, имеет вид:

$$p_{22}^{(2)} = -\rho \frac{\partial \Phi_{22_1}^{(2)}}{\partial t} - \rho \eta_g^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_2^{(1)}}{\partial y \partial t} - - \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right]; \quad (20)$$

при бортовой:

$$p_{44}^{(2)} = -\rho \frac{\partial \Phi_{44_1}^{(2)}}{\partial t} + \rho \theta_m^{(1)} z \frac{\partial^2 \Phi_4^{(1)}}{\partial y \partial t} - \rho \theta_m^{(1)} y \frac{\partial^2 \Phi_4^{(1)}}{\partial z \partial t} - - \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right]. \quad (21)$$

В силу асимметрии потенциалов $\Phi_2^{(1)}, \Phi_4^{(1)}, \Phi_{22_1}^{(1)}, \Phi_{44_1}^{(1)}$ относительно ДП судна, будут возникать следующие нелинейные силы и моменты: при поперечно-горизонтальной качке:

$$\begin{aligned}
 F_{H_{22}}^{(2)} &= \rho \iint_{\Omega} \frac{\partial \Phi_{22_1}^{(2)}}{\partial t} \cos(n, y) d\Omega; \\
 M_{X_{22}}^{(2)} &= \rho \iint_{\Omega} \frac{\partial \Phi_{22_1}^{(2)}}{\partial t} (y \cos(n, z) - z \cos(n, y)) d\Omega; \\
 M_{Z_{22}}^{(2)} &= \rho \iint_{\Omega} \frac{\partial \Phi_{22_1}^{(2)}}{\partial t} (x \cos(n, y) - y \cos(n, x)) d\Omega; \\
 F_{V_{22}}^{(2)} &= \iint_{\Omega} \bar{\eta}_g^{(1)} \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y \partial t} + \\
 &+ \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right] d\Omega - \\
 &- \frac{1}{2} \rho g \iint_{WL} z_W^2 n_{z_{WL}} dl; \\
 z_W &= -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial t}.
 \end{aligned} \tag{22}$$

при бортовой качке:

$$\begin{aligned}
 F_{H_{44}}^{(2)} &= \rho \iint_{\Omega} \frac{\partial \Phi_{44_1}^{(2)}}{\partial t} \cos(n, y) d\Omega; \\
 M_{X_{44}}^{(2)} &= \rho \iint_{\Omega} \frac{\partial \Phi_{44_1}^{(2)}}{\partial t} (y \cos(n, z) - z \cos(n, y)) d\Omega;
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 M_{Z_{44}}^{(2)} &= \rho \iint_{\Omega} \frac{\partial \Phi_{44_1}^{(2)}}{\partial t} (x \cos(n, y) - y \cos(n, x)) d\Omega; \\
 F_{V_{44}}^{(2)} &= \iint_{\Omega} \theta_m^{(1)} y \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z \partial t} - \theta_m^{(1)} z \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y \partial t} + \\
 &+ \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right] d\Omega - \\
 &- \frac{1}{2} \rho g \iint_{WL} z_W^2 n_{z_{WL}} dl; \\
 z_W &= -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_4^{(1)}}{\partial t} - y \theta_m^{(1)}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, непосредственно с вычислением потенциалов второго порядка связано определение нелинейных горизонтальных сил и моментов. Нелинейные вертикальные силы определяются полностью на основании решения задачи первого порядка.

Анализ результатов

На основании изложенного были разработаны две программы, реализующие определение нелинейных сил и моментов, возникающих при поперечно-горизонтальной и бортовой качке с использованием функции Грина для бесконечно-глубокой жидкости (14) и функции Грина для жидкости ограниченной глубины (15) в случае когда $H \rightarrow \infty$.

Расчеты нелинейных сил и моментов, проводились для различных типов судов по каждой из двух программ. В таблице 1 приведены основные характеристики данных судов.

Таблица 1

Таблица основных характеристик судов

Тип/ Название судна	L	B	T	δ	α
Танкер	310	47.2	18.9	0.85	0.9
Танкер "Баскунчак"	74	12	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

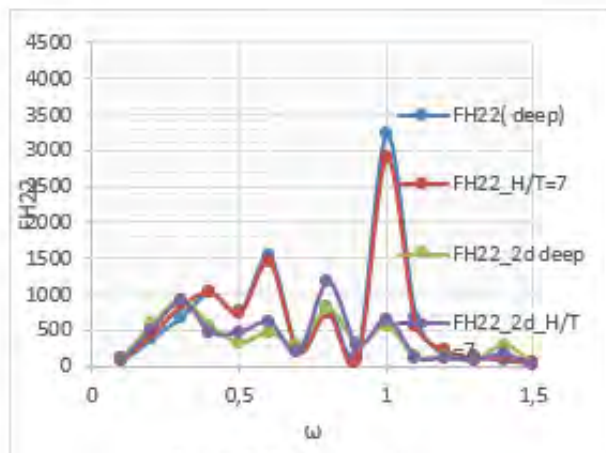


Рис. 1. $F_{H22}^{(2)}$ для танкера

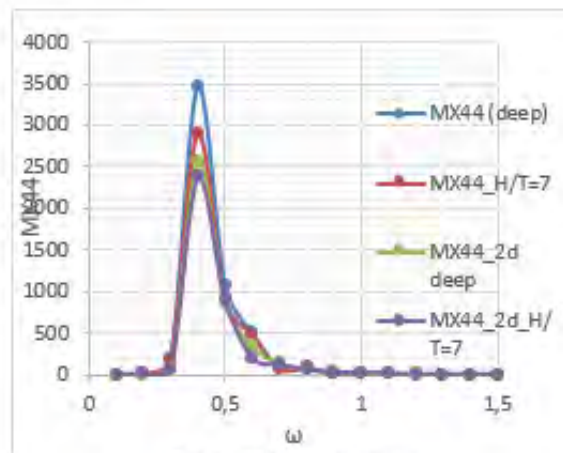


Рис. 4. $M_{X44}^{(2)}$ для танкера

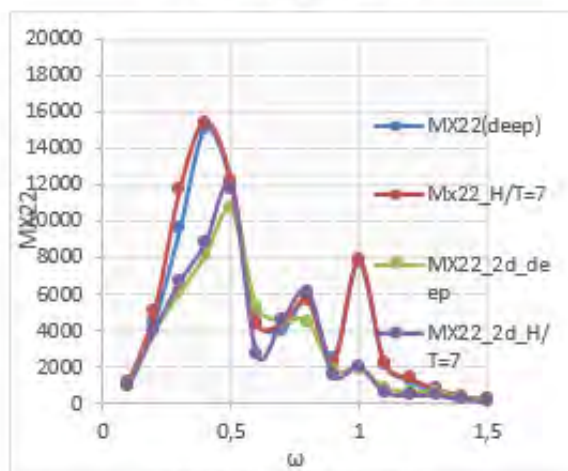


Рис. 2. $M_{X22}^{(2)}$ для танкера

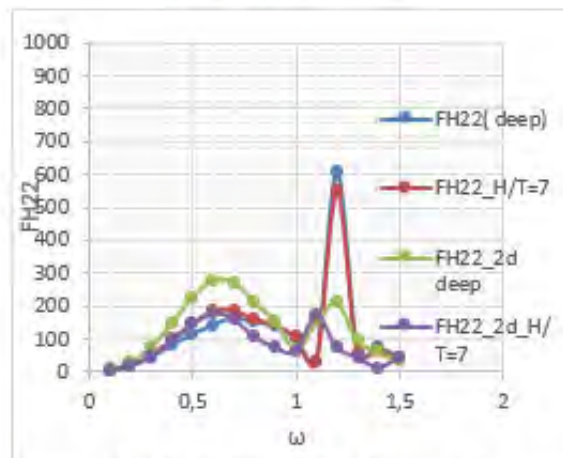


Рис. 5. $F_{H22}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак"

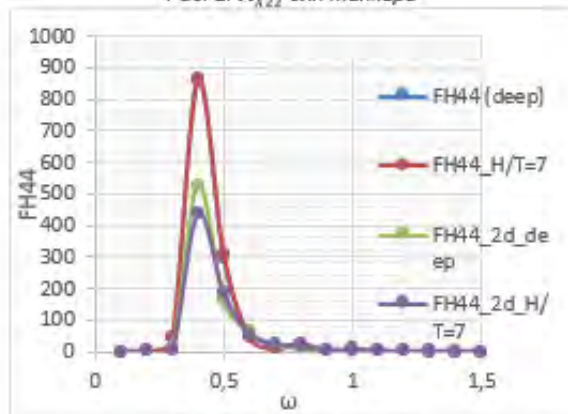


Рис. 3. $F_{H44}^{(2)}$ для танкера

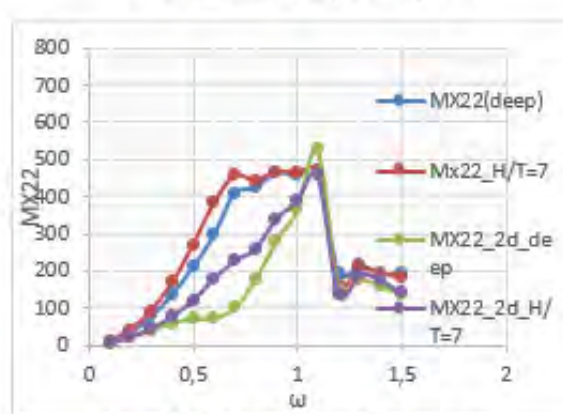


Рис. 6. $M_{X22}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак"

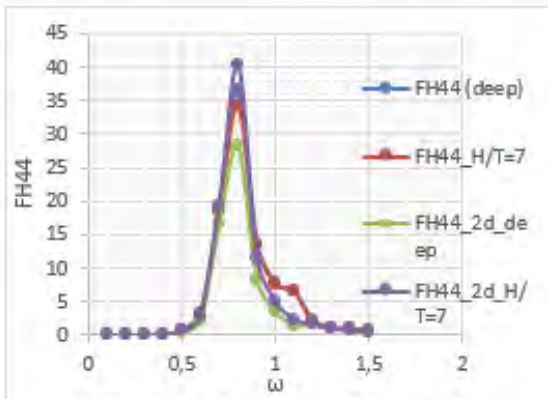


Рис. 7. $F_{H44}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак"

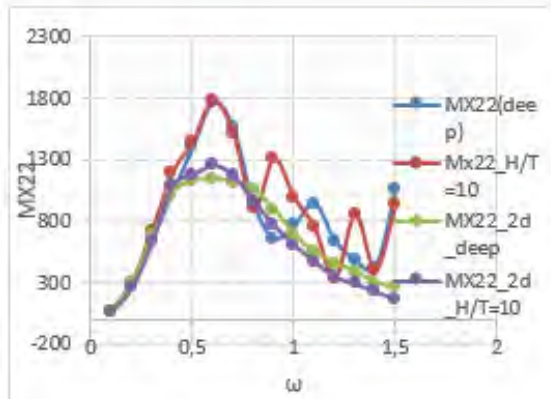


Рис. 10. $M_{X22}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов"

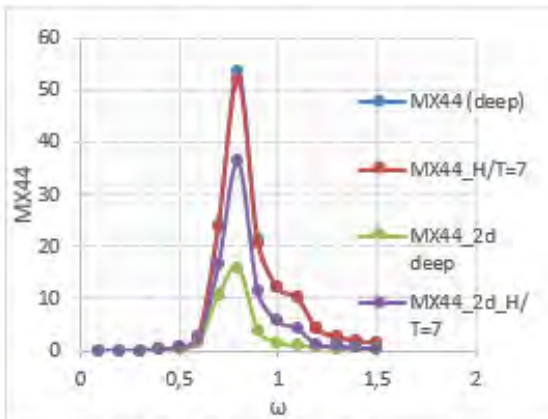


Рис. 8. $M_{X44}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак"

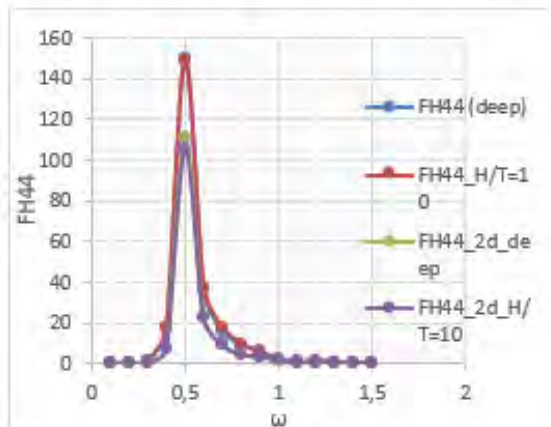


Рис. 11. $F_{H44}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов"

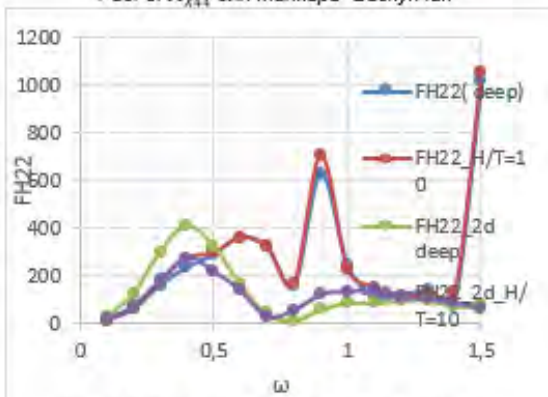


Рис. 9. $F_{H22}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов"

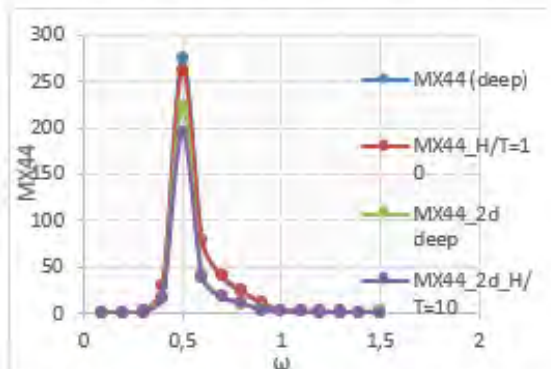


Рис. 12. $M_{X44}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов"

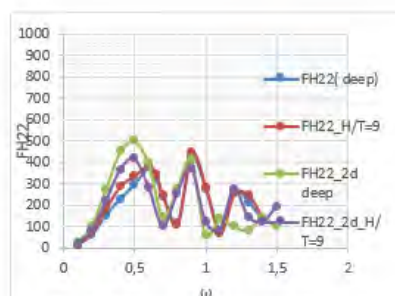


Рис. 13. $F_{H22}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков"

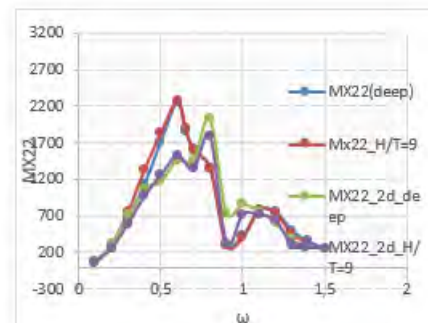
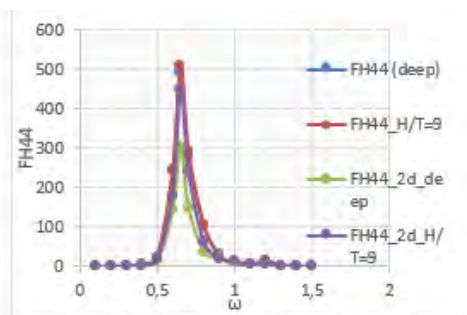
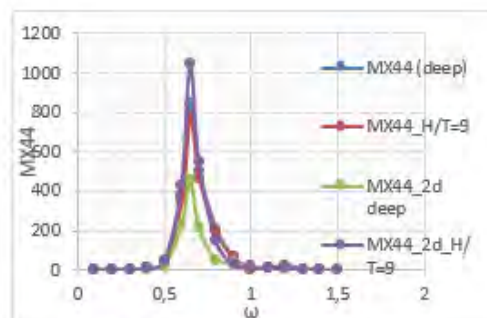


Рис. 14. $M_{X22}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков"


 Рис. 15. $F_{H44}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Носиков"

 Рис. 16. $M_{X44}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Носиков"

Полученные результаты расчетов приведены в сопоставлении с результатами, полученными при использовании программ, основанных на двумерной теории для бесконечно глубокой жидкости [1] и жидкости ограниченной глубины и жидкости ограниченной глубины [5]. Все расчеты выполнены для случая расположения лагом к набегающему волнению.

Из всех приведенных результатов видно, что все нелинейные силы и моменты, полученные по трехмерным методикам с использованием разных функций Грина совпадают между собой (рис.1-16).

Для нелинейных сил и моментов, возникающих при бортовой качке, характерно наличие пиков, на частотах, совпадающих с собственными частотами бортовой качки. Таким образом, наибольшие значения $F_{H44}^{(2)}$ и $M_{X44}^{(2)}$ имеют в области резонанса бортовой качки (рис.3,4,7,8,11,12,15,16).

В ряде случаев наблюдается очень хорошее согласование с расчетами по двумерной теории (рис.7,12,13,15,16). Нелинейные горизонтальные силы и моменты, полученные по трехмерной теории, наилучшим образом совпадают с расчетами по двумерной в диапазоне средних частот $0,7 < \omega < 1,2$. Наибольшее расхождение имеют место в области частот $\omega < 0,75$ (рис.1,2,6,14), что может быть связано с неточным учетом нелинейных факторов при использовании двумерной теории.

Для зависимостей нелинейных горизонтальных сил и моментов, возникающих при поперечно-горизонтальной качке, характерно наличие нерегулярных частот как при использовании трехмерных методов, так и двумерных (рис.1,2,5,9), что связано с особенностями метода интегральных уравнений [1], [5].

Заключение

В отличие от двумерных методов, разработанные методики и программы расчета нелинейных сил и моментов второго порядка успешно могут применяться в дальнейшем и при расчете качки на косых носовых и кормовых углах, не требуя введения специальных коэффициентов, учитывающих влияние курсового угла. Поэтому, на следующем этапе, целесообразно проведение расчетов нелинейных сил на косых углах, а также разработка программ расчета нелинейных сил, возникающих при продольно-горизонтальной качке, килевой качке, рысканье, где использование двумерных методов вообще не желательно из-за отсутствия учета продольного растекания.

Литература

- Семенова В. Ю. (1999) Исследование и разработка программ расчета нелинейных гидродинамических сил, возникающих при колебаниях контуров корабельной формы на свободной поверхности жидкости //Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Библиотека СПбГМТУ.
- Семенова В. Ю. (2005) Разработка метода расчета нелинейной качки судов //Дисс. на соиск. уч. степени д. т. н. Библиотека СПбГМТУ.
- Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2019) Определение инерционно-демпфирующих сил второго порядка малости, возникающих при качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии, № 2-1 (44)., с. 36-43
- Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2019) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при вертикальной качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии, № 4-1 (46)., с.63-69
- Со Чжо Ту (2014) Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье //Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Библиотека СПбГМТУ.
- Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusetts institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
- Lee C. H., Zhu X.(1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
- Ogilvie T. F.(1983) Second-order hydrodynamic effects on ocean platforms //Proceedings of the International Workshop on Ship and Platform Motions, Berkeley, C. 205-265.

References

- Semenova V. Ju.(1999) Issledovanie i razrabotka programm rascheta nelinejnyh gidrodinami-cheskih sil, vznikajushhih pri kolebanijah konturov korabel'noj formy na svobodnoj poverh-nosti zhidkosti [Research and development of programs for calculating nonlinear hydrodynamic forces arising from oscillations of ship-shaped contours on the free surface of a liquid]//Diss. na soisk. uch. step. kand. tehn. nauk. Biblioteka SPbGMTU.

2. Semenova V. Ju. (2005) Razrabotka metoda rascheta nelinejnoj kachki sudov [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships] //Diss. na soisk. uch. stepeni d. t. n. Biblioteka SPbGMTU.
3. Semenova V.Ju., Al'baev D.A. (2019). Opredelenie inercionno-dempfirujushhih sil vtorogo po-rjadka malosti, vznikajushhih pri kachke sudna, na osnovanii trehmernoj potentsial'noj teorii //Morskie intellektual'nye tehnologii, N 2 s. So. CH. T. Razrabotka metoda rascheta nelinejnykh sil vtorogo poriadka vznikajushchikh pri kachke sudna na melkovode [Determination of the second order inertial-damping forces arising during the oscillations of the ship based on the three-dimensional potential theory] //Diss. na. soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk. Biblioteka SPbGMTU. – 2014.
4. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2019) Opredelenie nelinejnykh sil vtorogo porjadka, vznikayushchikh pri vertikal'noj kachke sudna, na osnovanii trehmernoj potentsial'noj teorii. [Determination of nonlinear forces of the second order during the ship's vertical motions, based on the three-dimensional potential theory] Morskie intellektual'nye tehnologii, № 4-1 (46), s.63-69
5. So Chzho Tu (2014) Razrabotka metoda rascheta nelinejnykh sil vtorogo porjadka, vznikajushhih pri kachke sudna na melkovod'e [Development of a method for calculating nonlinear second-order forces arising from the ship's motions in shallow water] //Diss. na soisk. uch. step. kand. tehn. nauk. Biblioteka SPbGM-TU.
6. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusettes institute of technology De-partment of Ocean Engineering, Cambridge.
7. Lee C. H., Zhu X.(1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
8. Ogilvie T. F.(1983) Second-order hydrodynamic effects on ocean platforms //Proceedings of the International Workshop on Ship and Platform Motions, Berkeley, C. 205-265.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Семенова Виктория Юрьевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Viktoriya Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the head of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Альбаев Данил Айдарович, Студент (Магистр), ассистент кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: albaevdani@gmail.com

Danil A. Al'baev, Student (Master), assistant of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: albaevdani@gmail.com

УДК 629.5.06: 629.5.07

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.022

Повышение надежности гребных установок с изменяющимся направлением тяги гребного винта для судов ледового класса

А.П. Сеньков¹, В.И. Кузнецов¹, Д.В. Никущенко¹, А.И. Фрумен¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

Аннотация. Пропульсивные системы на основе гребных электрических установок (ГЭУ) «Азипод» или винторулевых колонках (ВРК) позволяют изменять направление тяги гребного винта относительно корпуса судна, за счет чего обеспечивают судам высокую маневренность и повышают безопасность плавания. Движительный модуль ГЭУ «Азипод» и поворотная часть ВРК присоединяются к неподвижной части гребной установки, закрепленной на корпусе судна, как консоль, на опоре вращения. В результате опора вращения находится под воздействием целой системы сил и моментов большой величины, в том числе под воздействием ударов льдин при плавании во льдах. Высокие механические нагрузки на опору вращения снижают надежность пропульсивных установок на судах ледового класса, вызывают деформации элементов конструкции судов, увеличивают шумы и вибрации. Для повышения механической прочности и надежности гребной установки предлагается закрепить нижнюю часть движительного модуля ГЭУ «Азипод» или поворотной части ВРК во второй опоре вращения. Такая конструкция снизит нагрузки на верхнюю опору вращения, повысит механическую прочность и надежность гребной установки. Уменьшит шумы и вибрации.

Ключевые слова: пропульсивная установка, гребная электрическая установка «Азипод», винторулевая колонка, судно ледового класса, ледокол.

Improving the reliability of propulsion systems with a varying propeller thrust for ice-class vessels

Aleksey P. Sen'kov¹, Viktor I. Kuznetsov¹, Dmitriy V. Nikushchenko¹, Aleksandr I. Frumen¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Propulsion systems based on Azipod propulsion systems or propeller-driven columns allow you to change the direction of propeller thrust relative to the hull of the vessel, thereby providing ships with high maneuverability and improving sailing safety. The Azipod propulsion module and the rotary part of the helical steering column are attached to the fixed part of the rowing installation, mounted on the hull of the vessel, like a console, on a rotation support. As a result, the rotation support is under the influence of a whole system of forces and moments of large magnitude, including under the influence of impacts of ice when swimming in ice. High mechanical loads on the rotation support reduce the reliability of propulsion systems on ice-class vessels, cause deformation of ship structural elements, and increase noise and vibration. To increase the mechanical strength and reliability of the rowing installation, it is proposed to fix the lower part of the Azipod propulsion module or the rotary part of the helical column in the second rotation support. This design will reduce the load on the upper support of rotation, increase the mechanical strength and reliability of the rowing installation. Reduce noise and vibration.

Key words: propulsion system, electric propulsion system Azipod, rotorcraft, ice class ship, icebreaker.

Введение

Системы электродвижения судов (СЭД) на основе установок «Азипод» [1] созданные фирмой АВВ обеспечивают высокую маневренность и безопасность плавания судов. Вследствие этих преимуществ гребные электрические установки (ГЭУ) «Азипод» широко применяются на судах практически всех видов – ледоколах, пассажирских лайнерах, контейнеровозах, буксирах, паромах, танкерах и т.д. С момента создания первой установки Азипод прошло более тридцати лет, и за эти годы фирма АВВ разработала несколько серий гребных установок Азипод, в том числе серию Azipod® VI (рисунок 1), предназначенную для судов ледового класса [2].

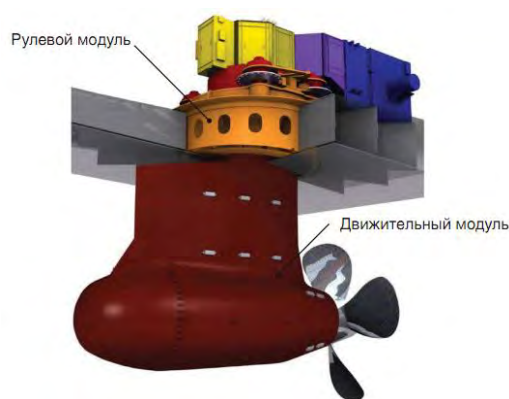


Рис. 1. Установка «Azipod® VI»

Построены и успешно эксплуатируются многие суда ледового класса с ГЭУ «Азипод»: ледоколы «Botnica», «Polaris», «Владислав Стрижов», «Петр Топчеев», арктические танкеры «Tempera» и «Mastera», танкеры снабжения «Михаил Ульянов» и «Кирилл Лавров» и многие другие.

Особый интерес представляет конструкция ледокола «Polaris» и его более мощных аналогов «Андрей Вилькицкий» и «Александр Санников» (рисунок 2) [3, 4].



Рис. 2. Проект ледоколов «Андрей Вилькицкий» и «Александр Санников»

Ледоколы «Андрей Вилькицкий» и «Александр Санников» построены на Выборгском судостроительном заводе и переданы ПАО «Газпром нефть» в 2018 году. Винторулевая система ледоколов «Андрей Вилькицкий» и «Александр Санников» состоит из двух установок «Азипод» мощностью по 7,5 МВт, установленных в кормовой части, и одной установки «Азипод» мощностью 6,5 МВт, расположенной в носовой части. Кроме того, ледоколы имеют носовое тоннельное подруливающее устройство, мощностью 1,8 МВт. Система движителей ледоколов обеспечивает высокую маневренность и возможность преодолевать льды толщиной до 2 метров, что успешно подтверждено ходовыми испытаниями и опытом эксплуатации ледоколов.

1. Особенности конструкции установок «Азипод»

В ГЭУ «Азипод» гребной электродвигатель размещается в герметизированной гондole движительного модуля. На выходном валу электродвигателя, выведенном из гондолы через герметичные уплотнения, установлен гребной винт. В корпусе кормовой части судна закреплен рулевой модуль ГЭУ, к которому на опоре вращения присоединен движительный модуль. С помощью электрогидравлического рулевого привода движительный модуль способен поворачиваться относительно рулевого модуля и корпуса судна на 360°. Подключение обмоток гребного электродвигателя к выходу преобразователя частоты при повороте движительного модуля обеспечивается через скользящие контакты блока контактных колец.

Схематично способ присоединения движительного модуля к рулевому модулю и кормовой части судна показан на рисунке 3.

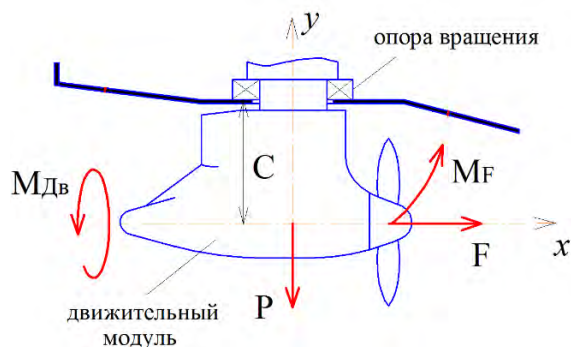


Рис. 3. Способ присоединения движительного модуля к рулевому модулю и кормовой части судна установки «Азипод» и система сил и моментов, действующих на движительный модуль

Для того чтобы обеспечить возможность поворота движительного модуля относительно корпуса судна, движительный модуль подвешен на опоре вращения к рулевому модулю как консоль. При движении судна опора вращения испытывает воздействие системы линейных сил и моментов большой величины. На опору вращения движительного модуля действуют:

- вес P движительного модуля и гребного винта, направленный вдоль вертикальной оси y ;
- сила тяги гребного винта F , направленная вдоль горизонтальной оси x ;
- вращающий момент $M_{дв}$ гребного двигателя, приложенный к статору, закрепленному в движительном модуле;
- момент M_F , создаваемый силой тяги F гребного винта.

Рассмотрим, какой величины могут достигать силы и моменты, действующие на опору вращения во время работы с номинальной мощностью гребной установки Azipod® VI2500, наиболее мощной из установок Азипод ледового класса. ГЭУ Azipod® VI2500 установлены на арктических танкерах «Tempera» и «Mastera», которые круглый год транспортируют нефть из г. Приморск в Финляндию [5].

Вес движительного модуля ГЭУ Azipod® VI2500 без гребного винта 270 тонн, вес гребного винта около 70 тонн, в сумме сила $P=340$ тонн [1, с. 16]. Номинальная мощность гребного электродвигателя 16000 кВт, номинальная частота вращения $n=86$ об/мин=9 1/с [5], отсюда $M_{дв}=1780$ тонн*м. Сила тяги гребного винта $F=1800$ кН=180 тонн [1, с. 10]. Для установки Azipod® VI2500 длина $C=5.5$ м, отсюда $M_F=1100$ тонн*м. Как видно, на опору вращения движительного модуля и элементы конструкции кормовой части судна действуют очень большие силы и моменты.

Однако кроме перечисленных сил и моментов при плавании судов в ледовых условиях на движительный модуль будут также воздействовать удары льдин с различных направлений, которые будут создавать дополнительные импульсные силы горизонтальных направлений и моменты аналогичных M_F .

Ледоколы, оснащенные ГЭУ Азипод, успешно работают в Балтийском море и в западных морях Российской акватории Северного Ледовитого океана. Для этих морей характерны однолетние льды толщиной до 2 метров.

Но в высоких широтах и в восточных морях Северного Ледовитого океана встречаются многолетние паковые льды толщиной более 3 м, намного более твердые, чем однолетний лед. Столкновение с такими льдами может привести к повреждению рулевого механизма и гребного винта, снижению ресурса и надежности ГЭУ Азипод. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность снижения нагрузки на опору вращения и повышения механической прочности и надежности ГЭУ «Азипод».

2. Повышение надежности и механической прочности ГЭУ «Азипод»

Слабым местом ГЭУ «Азипод» является консольное закрепление движительного модуля [11]. Следствиями такого способа присоединения движительной установки к рулевому модулю и корпусу судна являются высокая нагрузка на верхнюю опору вращения движительного модуля, низкая механическая прочность и надежность, деформация элементов конструкции судна, шум и вибрации. Этот недостаток можно устранить организацией второй опоры вращения в нижней части движительного модуля [6, 7]. На рисунке 4 показана кормовая оконечность судна ледового класса с более надежным способом установки движительного модуля [7].

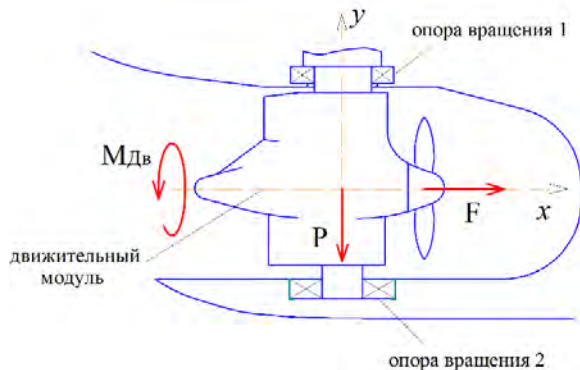


Рис. 4. Способ установки движительного модуля ГЭУ «Азипод» с двумя опорами вращения

Нижняя часть кормы корпуса судна выполнена удлиненной, чтобы иметь возможность разместить в ней второй опоры вращения для движительного модуля. В этом случае нагрузки на верхнюю опору вращения намного снизятся. Вес P движительного модуля по-прежнему будет приложен к верхнему подшипнику. Момент двигателя $M_{дв}$ будет создавать радиальные силы, действующие на обе опоры вращения. Сила тяги гребного винта F будет также создавать радиальные силы, действующие на обе опоры вращения. Момент $M_{в}$, создаваемый силой тяги F гребного винта, при таком способе закрепления движительного модуля будет практически равен нулю.

Кроме того, движительный модуль и гребной винт в такой конструкции будут лучше защищены от ударов льдин. Ледоколы и суда ледового класса, оснащенные подобными ГЭУ, смогут работать в более сложной ледовой обстановке.

В предлагаемом варианте конструкции ГЭУ нижняя опора вращения должна быть способна работать в морской воде. Подшипники, способные работать в морской воде, разрабатывают и изготавливают, например, зарубежные фирмы Thordon Bearings Inc. и GGB, в РФ - головной филиал «НПО «Винт» ОАО «ЦС «Звездочка» и ЦНИИ КМ «Прометей».

Научно-производственное объединение «Винт» - одно из ведущих предприятий в РФ по созданию пропульсивных комплексов для судов и кораблей. В НПО «Винт» разработана уникальная технология по изготовлению металлофторопластовых вкладышей для подшипников, работающих в морской воде [8]. НПО «Винт» успешно применяет разработанные «самосмазывающиеся» подшипники уже более 20 лет. По информации, приведенной на сайте НПО «Винт» [9], подшипники не требуют смазки маслом, имеют низкий коэффициент трения (0,05-0,1), высокую прочность на сжатие (350 кгс/см²), обладают стойкостью к динамическим нагрузкам. Габариты «самосмазывающихся» подшипников не ограничены, срок службы не менее 30 лет.

ЦНИИ КМ «Прометей» разработало и производит изделия из антифрикционных углепластиков марок УГЭТ и ФУТ для подшипников скольжения и торцевых уплотнений, способных работать в агрессивных жидкостях, в том числе в морской воде [9]. Углепластики могут работать по контртелам из бронзы, стали, титановых сплавов и керамики. Подшипники имеют низкий коэффициент трения (0,06-0,12). Антифрикционные углепластики УГЭТ и ФУТ являются высокопрочными, износостойкими материалами, не изменяющими свои размеры и свойства при длительной эксплуатации в воде, обладают высокой ударпрочностью, что исключает сколы, растрескивания и другие повреждения в условиях интенсивных ударных нагрузок.

Как видно из информации, приведенной разработчиками, подшипники и НПО «Винт», и ЦНИИ КМ «Прометей» способны обеспечить надежное закрепление движительной установки в нижней части кормы.

Выше рассмотрен способ повышения механической прочности и надежности пропульсивной установки типа «Азипод», однако этот способ применим и для движительных установок на основе винторулевых колонок (ВРК) «Z-Drive» и «L-Drive». Поворотная часть ВРК, имеющая валопровод большой длины и один или два зубчатых редуктора, также, как и ГЭУ «Азипод» имеют одну опору вращения в верхней части. При этом ВРК более уязвимы для ударов льдов, и закрепление нижней части ВРК во второй опоре вращения, может существенно повысить механическую прочность и надежность движительных установок с ВРК.

На рисунке 5 показано, как может выглядеть кормовая часть судна с движительной установкой, закрепленной в двух опорах вращения.



Рис. 5. Кормовая часть судна с движительной установкой, закрепленной в двух опорах вращения

Применение на судах движительной установки с двумя опорами вращения позволит использовать

ГЭУ «Азипод» и ВРК в тяжелых ледовых условиях Северного морского пути.

Выводы

1. Консольный способ установки движительного модуля ГЭУ «Азипод» и ВРК на одной опоре вращения для судов ледового класса недостаточно надежен, приводит к большим нагрузкам на опору вращения, деформации элементов конструкции судна, повышенным шумам и вибрациям.

2. Закрепление нижней части ГЭУ «Азипод» во втором подшипниковом узле повышает механическую прочность и надежность пропульсивной установки, значительно снижает нагрузку на верхний подшипник, защищает движительный модуль и гребной винт от ударов льда, уменьшает шум и вибрацию.

3. Способ закрепления поворотной части пропульсивной установки в двух подшипниковых узлах применим также и к ВРК, что позволит использовать ВРК в более тяжелых ледовых условиях.

Литература

1. Патент № US6688927B2. Arrangement and method for turning a propulsion unit / Jussi Aarnivuo, патентообладатель АББ ОЙ, 2004.
2. Представление двигателей Azipod® серии VI. Хельсинки, март 2010 г. https://library.e.abb.com/public/908eb000f6546300c12577e5004191aa/Azipod_VI_project_guide_RU.pdf.
3. Проект IBSV01, тип Aker ARC 130A. <https://fleetphoto.ru/projects/4404/>.
4. Инженер Aker Arctic: "Андрей Вилькицкий" – арктическая версия ледокола Polaris. <https://sudostroenie.info/novosti/25442.html>.
5. МТ «Мастера». http://en.wikipedia.ru/wiki/MT_Mastera#cite_note-tt-7.
6. Патент РФ на полезную модель №180240, Судовая движительная установка / Кузнецов В.И., Сеньков А.П., Ткаченко И.В., Фрумен А.И. БИ 2018, №16.
7. Патент РФ на полезную модель №190800, Кормовая оконечность корпуса судна ледового плавания с движительной установкой / Кузнецов В.И., Никущенко Д.В., Сеньков А.П., Фрумен А.И., БИ 2019, №20.
8. Патент РФ на изобретение №2072457, Способ изготовления подшипников / Васильев В.Ф., Ганделев В.А., Зюмченко П.С., Мартиросов Г.Г., Миронкин Е.А., Файнгерц Л.Е., Шепелев М.И. 27.01.1997.
9. Головной филиал «НПО «Винт» ОАО «ЦС «Звездочка», <http://www.vintnpo.ru/about>.
10. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» - ФГУП ЦНИИ Конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина, <http://www.cris-m-prometey.ru>.
11. Трошов С.Т., Фрумен А.И. Методы повышения надежности эксплуатации винторулевых колонок рейдовых буксиров. Ж. «Морские интеллектуальные технологии». № 4(30) т.1. СПб. 2015, стр. 32-36.

References

1. Jussi Aarnivuo. Arrangement and method for turning a propulsion unit. Patent № US6688927B2, ABB OY, 2004.
2. Predstavlenie dvizhiteley Azipod serii VI. Khel'sinki [Introducing Azipod® VI Series Propulsion]. Khel'sinki, 2010. https://library.e.abb.com/public/908eb000f6546300c12577e5004191aa/Azipod_VI_project_guide_RU.pdf.
3. Proekt IBSV01, tip Aker ARC 130A [Project IBSV01, type Aker ARC 130A]. <https://fleetphoto.ru/projects/4404/>.
4. Inzhener Aker Arctic: "Andrey Vil'kitskiy" – arkticheskaya versiya ledokola Polaris [Aker Arctic engineer: "Andrei Vilkitskiy" - Arctic version of the Polaris icebreaker]. <https://sudostroenie.info/novosti/25442.html>.
5. МТ «Mastera». http://en.wikipedia.ru/wiki/MT_Mastera#cite_note-tt-7.
6. Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P., Tkachenko I.V., Frumen A.I. Sudovaya dvizhitel'naya ustanovka [Ship propulsion system]. Utility Model Patent of the RF № 180240, 2018.
7. Kuznetsov V.I., Nikushchenko D.V., Sen'kov A.P., Frumen. Kormovaya okonechnost' korpusa sudna ledovogo plavaniya s dvizhitel'noy ustanovkoy [The aft end of the hull of an ice navigation vessel with a propulsion system]. Utility Model Patent of the RF № 190800, 2019.
8. Vasil'ev V.F., GandeleV V.A., Zyumchenko P.S., Martirosov G.G., Mironkin E.A., Fayngerts L.E., Shepelev M.I. Sposob izgotovleniya podshipnikov [A method of manufacturing bearings]. 1997.
9. Golovnoy filial «NPO «Vint» ОАО «TsS «Zvezdochka». <http://www.vintnpo.ru/about>
10. Natsional'nyy issledovatel'skiy tsentr «Kurchatovskiy institut» - FGUP TsNII Konstruktsionnykh materialov «Prometey» imeni I.V. Gorynina. <http://www.cris-m-prometey.ru>.
11. Troshov S.T., Frumen A.I. Methods to improve the reliability of the operation of columns with of steering propeller of raid tugs. "Marine Intelligent Technologies", № 4 (30) t.1, SPb, 2015, p.32-36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Петрович Сеньков, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: senkov@smtu.ru

Виктор Иванович Кузнецов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kuznetsov-spb@bk.ru

Дмитрий Владимирович Никущенко, доктор технических наук, проректор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikushchenko@smtu.ru

Александр Исаакович Фрумен, кандидат технических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: grossfrum7@mail.ru

Aleksey P. Sen'kov, Dr. Sci. (Eng), professor, State Marine Technical University of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: senkov@smtu.ru

Viktor I. Kuznetsov, Ph.D. (Eng), research fellow, State Marine Technical University of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: kuznetsov-spb@bk.ru

Dmitriy V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng), vice-rector, State Marine Technical University of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: nikushchenko@smtu.ru

Aleksandr I. Frumen, Ph.D. (Eng), professor, State Marine Technical University of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: grossfrum7@mail.ru

УДК 532.5:001.5
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.023

Связь между динамической и объемной вязкостями жидкости

В.А. Павловский¹, Д.В. Никущенко¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Во многих технических устройствах реализуются течения, при описании которых фигурируют различные виды вязкостей. В работе рассмотрены вопросы возникновения этих вязкостей и связь между ними. Показано, как тензор материальных констант 4C - тензор 4-го ранга, имеющий 81 компоненту, переводит тензор скоростей деформаций в тензор вязких напряжений. При рассмотрении связи между тензорами скоростей деформаций и вязких напряжений после перехода из трехмерного пространства в шестимерное, и использования свойств симметрии среды, можно заметить, что число независимых материальных констант для изотропных жидкостей сводится к двум константам Ламе. Рассмотрение скорости объемного расширения жидкости приводит к появлению объемной вязкости, которая выражается через эти константы. В случае равенства нулю объемной вязкости имеет место модель ньютоновской стоксовой жидкости, в которой постоянные Ламе становятся пропорциональными друг другу. Далее записаны уравнения Навье-Стокса при разных выражениях для вязкости жидкости.

Ключевые слова: течение жидкости, вязкость, тензор скоростей деформаций, тензор материальных констант, материальные константы Ламе, анизотропия, изотропная жидкость, объемная вязкость, уравнения Навье-Стокса.

Relation between dynamic and bulk viscosities

Valery A. Pavlovsky¹, Dmitry V. Nikushchenko¹

¹St. Petersburg State Marine Technical University

Abstract. When describing many real flows in technical systems, different kinds of viscosities are usually used. In the present article, we discuss how these kinds of viscosities occur and what are relations between them. We show how material constants tensor 4C (4th rank tensor containing 81 terms) transforms strain rate tensor into viscous stresses tensor. Considering the relationship between the strain rate tensors and viscous stresses after the transition from three-dimensional to six-dimensional space and using the symmetry properties of the medium, it can be obtained that the number of independent material constants for isotropic fluids decreases to two Lamé constants. Taking into account volume expansion rate leads to volume viscosity, which is expressed with that constants. When bulk viscosity is equal to zero there is a model of Newtonian liquid, where Lamé constants become proportional to each other. Finally Navier-Stokes equations are written for different expressions of fluid viscosity.

Keywords: fluid flow, viscosity, strain rate tensor, stress tensor, tensor of material constants, Lamé constants, anisotropy, bulk viscosity, Navier-Stokes equations.

Введение

Тензор напряжений Коши $\underline{\sigma}$, который всегда симметричен по определению, для течения вязкой жидкости обычно [1,2] представляют в виде:

$$\underline{\sigma} = -p\underline{E} + \underline{\tau}, \quad (1)$$

где p - давление, \underline{E} - единичный тензор, $\underline{\tau}$ - тензор вязких напряжений. Тензор $\underline{\tau}$ равен нулю для идеальной жидкости, в отличие от жидкости, обладающей вязкостью. При этом в ламинарном режиме $\underline{\tau}$ является тензором чисто вязких напряжений, а при турбулентном течении он включает в себя, помимо вязких, еще и турбулентные напряжения.

В общем случае течения вязкой жидкости тензор напряжений $\underline{\tau}$ линейно связан с тензором скоростей деформаций $\underline{S} = \frac{1}{2}(\nabla\bar{V} + \bar{V}\nabla^T)$, где T - символ транспонирования:

$$\underline{\tau} = \underline{S} : ({}^4C), \quad (2)$$

Здесь 4C - тензор материальных констант, двоеточие - символ двойного скалярного произведения. В компонентной форме эту формулу можно представить в виде:

$$\tau_{ks} = S_{ij} C_{jiks}. \quad (3)$$

Тензор четвертого ранга 4C , имеющий 81 компоненту, переводит тензор \underline{S} в тензор $\underline{\tau}$. Однако, вследствие симметрии тензоров \underline{S} и $\underline{\tau}$ остается лишь

36 различных между собою компонент тензора 4C . При записи выражения (3) через эти 36 коэффициентов, двойные индексы у компонент тензоров напряжений и скоростей деформаций, следуя Ламе [3,4], удобно заменить на одинарные, которые меняются от 1 до 6 (а не от 1 до 9 вследствие симметрии тензора напряжений):

$$\begin{aligned} \tau_{11} &= \tau_1; \tau_{22} = \tau_2; \tau_{33} = \tau_3; \\ \tau_{23} &= \tau_4; \tau_{13} = \tau_5; \tau_{12} = \tau_6; \\ S_{11} &= S_1; S_{22} = S_2; S_{33} = S_3; \\ S_{23} &= S_4; S_{13} = S_5; S_{12} = S_6; \end{aligned}$$

После перехода таким способом к шестимерному пространству, соотношение (3) в компонентном виде запишется следующим образом:

$$\tau_k = S_M C_{MK}, \quad K, M=1,2,3,4,5,6. \quad (4)$$

Теперь 36 компонент тензора материальных констант обозначены как C_{MK} , а заглавные латинские буквы использованы как индексы, пробегающие значения от 1 до 6. Матрица материальных констант приобретает следующий вид:

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix}.$$

Можно показать, что эта матрица симметрична, т.е. $C_{MK} = C_{KM}$, и тогда различными константами

оказываются лишь 21 из 36. Дальнейшее уточнение матрицы C_{MK} возможно после разделения сред на анизотропные (свойства которых зависят от направления) и изотропные. В общем случае для анизотропных сред количество констант – 21, однако часто даже анизотропные материалы имеют плоскости или оси симметрии. Это приводит к дальнейшему уменьшению числа независимых констант материалов. Так, если в некоторой точке существует плоскость симметрии свойств материала (т.е. константы C_{MK} имеют одинаковые значения для любой пары систем координат, которые получены одна из другой отражением относительно указанной плоскости), то число независимых констант сокращается до 13. Если среда обладает тремя взаимно перпендикулярными плоскостями симметрии, то она называется ортотропной, а матрица такого материала в системе координат, плоскости которой совпадают с плоскостями симметрии, имеет вид:

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}$$

Несложно видеть, что здесь независимых констант девять.

Говорят, что в некоторой точке существует ось симметрии свойств порядка N , если существует набор направлений, при повороте относительно оси на угол $\frac{2\pi}{N}$. Некоторые случаи осевой и плоской симметрии эквивалентны.

Для изотропных сред любая плоскость и любая ось являются плоскостью и осью симметрии. В этом случае число независимых материальных констант сводится к двум [4], а матрица C_{MK} принимает вид:

$$\begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{pmatrix} \quad (5)$$

Здесь эти независимые константы обозначены как λ и μ .

Постоянные λ и μ называются постоянными Ламе и имеют смысл вязкостей, их размерность – Па·с, причем μ носит наименование динамической вязкости, а λ – второй вязкости.

Используя матрицу (5) можно согласно формулы (4) записать выражение для шести компонент тензора напряжений, придавая индексам значения 1, ..., 6:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= S_1 C_{11} + S_2 C_{21} + S_3 C_{31} + S_4 C_{41} + S_5 C_{51} + S_6 C_{61} = \\ &= S_1(\lambda + 2\mu) + S_2\lambda + S_3\lambda + S_4 * 0 + S_5 * 0 + S_6 * 0 = \\ &= \lambda(S_1 + S_2 + S_3) + 2\mu S_1 = \\ &= \lambda \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) + 2\mu S_1 = \lambda \bar{\nabla} \cdot \bar{v} + 2\mu S_1. \end{aligned}$$

Тем самым эта нормальная компонента тензора напряжений, учитывая соответствующее переобозначения принимает вид:

$$\tau_{11} = 2\mu S_{11} + \lambda \bar{\nabla} \cdot \bar{v}$$

Аналогично, из выражений для τ_2 и τ_3 можно получить:

$$\begin{aligned} \tau_{22} &= 2\mu S_{22} + \lambda \bar{\nabla} \cdot \bar{v}, \\ \tau_{33} &= 2\mu S_{33} + \lambda \bar{\nabla} \cdot \bar{v}. \end{aligned}$$

Для касательных напряжений имеем:

$$\begin{aligned} \tau_4 &= S_1 C_{14} + S_2 C_{24} + S_3 C_{34} + S_4 C_{44} + S_5 C_{54} + S_6 C_{64} = \\ &= S_1 * 0 + S_2 * 0 + S_3 * 0 + S_4 * 2\mu + S_5 * 0 + S_6 * 0 = \\ &= 2\mu S_4 \end{aligned}$$

Тем самым, учитывая симметрию тензоров напряжений и скоростей деформаций:

$$\tau_{23} = 2\mu S_{23} = 2\mu S_{32} = \tau_{32}$$

Аналогично из выражений τ_5 и τ_6 имеем:

$$\tau_{13} = 2\mu S_{13} = 2\mu S_{31} = \tau_{31}$$

$$\tau_{12} = 2\mu S_{12} = 2\mu S_{21} = \tau_{21}$$

В итоге матрицу компонент тензора напряжений можно представить в виде:

$$\begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{pmatrix} = 2\mu \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} + \lambda (\bar{\nabla} \cdot \bar{v}) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Откуда следует, что для изотропной (ньютоновской) жидкости соотношения (2) приводится к виду [5,6]

$$\underline{\tau} = \lambda (\text{tr} \underline{S}) \underline{E} + 2\mu \underline{S}, \quad (6)$$

где $\text{tr} \underline{S}$ - след тензора (сумма его диагональных компонент в матрице компонент), который, как известно [6], определяется формулой:

$$\text{tr} \underline{S} = \underline{S} : \underline{E} = \bar{\nabla} \cdot \bar{v},$$

т.е. имеет смысл дивергенции поля скоростей жидкости.

С учетом выражений (1) и (6) тензор напряжений $\underline{\sigma}$ вязкой жидкости записывается в виде:

$$\underline{\sigma} = -p \underline{E} + \lambda (\bar{\nabla} \cdot \bar{v}) \underline{E} + 2\mu \underline{S}. \quad (7)$$

Величина $\text{div} \bar{v} = \bar{\nabla} \cdot \bar{v}$ характеризует скорость объемного расширения (сжатия) жидкости при ее движении, ее физический смысл виден из формулы:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{v} = \frac{1}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial t}, \quad 1/c,$$

где V, m^3 - рассматриваемый объем жидкости.

Возьмем след тензорного равенства (7). Для левой части:

$$\text{tr} \underline{\sigma} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = \theta.$$

Величина θ , представляющая сумму диагональных компонент тензора $\underline{\sigma}$, равна следу правой части выражения (7) и тогда можно записать:

$$\theta = -3p + 3\lambda (\bar{\nabla} \cdot \bar{v}) + 2\mu (\bar{\nabla} \cdot \bar{v}). \quad (8)$$

Отсюда скорость объемного расширения (сжатия):

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{v} = \frac{3p + \theta}{3\lambda + 2\mu} \quad (9)$$

Когда жидкость находится в равновесии, т.е. $\bar{\nabla} \cdot \bar{v} = 0$, а также при достижении покоя, величина $\theta = -3p$. Если же этого нет, то $\theta \neq -3p$.

Пусть в рассматриваемой точке внезапно возникнет давление p' , не равное давлению p окружающей среды, т.е. $p' \neq p$. Тогда величина θ будет равна $\theta = -3p$, и жидкость придет в движение, причем скорость ее объемного расширения будет:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{v} = \frac{3p - 3p'}{3\lambda + 2\mu} = \frac{p - p'}{\lambda + \frac{2}{3}\mu} \quad (10)$$

Величину в знаменателе правой части называют объемной вязкостью и обозначают ξ :

$$\xi = \lambda + \frac{2}{3}\mu. \quad (11)$$

Тогда предыдущая формула (10) переписывается в виде:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{v} = \frac{p - p'}{\xi}$$

Отсюда видно, что если $p' < p$, то величина $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} > 0$ и наоборот. После истечения некоторого времени возмущение, исчезает, давление $p' \rightarrow p$, жидкость возвращается в исходное состояние, $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} \rightarrow 0$.

Объемная вязкость – это свойство жидкости, характеризующее необратимое превращение механической энергии в теплоту при объемных деформациях, которое проявляется особенно сильно при распространении звуковых колебаний. Значение ζ определяется по измерениям коэффициента поглощения звука в среде. Величина ζ обычно уменьшается при повышении температуры и увеличивается с повышением давления. Вязкости ζ и μ являются величинами одного порядка только в некоторых жидкостях, в большинстве же случаев величина ζ намного превосходит величину μ (Таблица 1).

Таблица 1.

Значения μ и ζ/μ для некоторых жидкостей

Жидкость	Температура, °С	$\mu, 10^{-3}$ Па·с	ζ/μ
Вода	15	1.1	2.81
Глицерин	-14	61600	1.03
Бензол	20	0.65	130
Сероуглерод	20	0.36	1600

В гидродинамике жидкость называют стоксовой ньютоновской, если объемная вязкость $\zeta=0$. В этом случае $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} \rightarrow \infty$, т.е. скорость изменения объема является бесконечно большой, возмущение распространяется бесконечно быстро. Модель стоксовой ньютоновской жидкости является наиболее используемой в современной гидродинамике вязкой жидкости [1], для нее, согласно (11), имеем:

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu. \quad (12)$$

При этом выражение (8) дает $\theta = -3p$. Тогда согласно формуле (7) реологическим соотношением будет следующее выражение:

$$\underline{\sigma} = -p\underline{E} - \frac{2}{3}\mu(\vec{\nabla} \cdot \vec{V})\underline{E} + 2\mu\underline{S}, \quad (13)$$

или, в терминах компонент:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} - \frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial v_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} + 2\mu s_{ij}.$$

После подстановки соотношения (13) в уравнение движения сплошной среды в напряжениях получаем векторное уравнение Навье-Стокса:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{\nabla}\left(p + \frac{2}{3}\mu\vec{\nabla} \cdot \vec{V}\right) + \vec{\nabla} \cdot (2\mu\underline{S}) + \rho\vec{f}. \quad (14)$$

Если динамическая вязкость постоянна, $\mu = const$, то уравнение (14) принимает вид:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{\nabla}p - \frac{1}{3}\mu\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) + \vec{\nabla}(\mu\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) + \mu\Delta\vec{V} + \rho\vec{f}, \quad (15)$$

а если к тому же жидкость несжимаема, то имеем:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{\nabla}p + \mu\Delta\vec{V} + \rho\vec{f}. \quad (16)$$

Если же объемная вязкость $\xi \neq 0$, т.е. ньютоновская жидкость не является стоксовой, то $\lambda = -\frac{2}{3}\mu + \xi$, и вместо формулы (13) реологическим соотношением будет следующее выражение:

$$\underline{\sigma} = -p\underline{E} - \left(\frac{2}{3}\mu - \xi\right)(\vec{\nabla} \cdot \vec{V})\underline{E} + 2\mu\underline{S}, \quad (17)$$

Для краткости записи можно обозначить шаровую часть тензора напряжений через p' :

$$p' = p + \left(\frac{2}{3}\mu - \xi\right)\vec{\nabla} \cdot \vec{V}. \quad (18)$$

Тогда в итоге можно записать:

$$\underline{\sigma} = -p'\underline{E} + 2\mu\underline{S}, \quad (19)$$

или:

$$\underline{\sigma} = -p'\underline{E} + \mu(\vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot \vec{V}^T). \quad (20)$$

Взяв операцию получения следа для правой и левой частей этого выражения, получаем:

$$\theta = -3p' + 2\mu(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}), \quad (21)$$

или, учитывая (18):

$$\theta = -3p - (2\mu - 3\xi)\vec{\nabla} \cdot \vec{V} + 2\mu\vec{\nabla} \cdot \vec{V}.$$

Тем самым имеем:

$$\theta = -p + 3\xi\vec{\nabla} \cdot \vec{V},$$

откуда скорость объемного расширения:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{3p + \theta}{3\lambda + 2\mu'}$$

что совпадает с формулой (9), как и следовало ожидать.

Уравнение движения такой ньютоновской жидкости с объемной вязкостью ξ будет выглядеть так:

$$p \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{\nabla}p' + \vec{\nabla} \cdot 2\mu\underline{S} + \rho\vec{f}, \quad (22)$$

где p' определено выражением (19).

В компонентной форме это уравнение имеет вид:

$$p\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\frac{2}{3}\mu - \xi\right) \cdot \frac{\partial v_k}{\partial x_k}\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right] + \rho f_i.$$

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М. : Наука, 1987. – 840 с.
2. Астарита Д., Маруччи Д. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. – М. : Мир, 1978. – 309 с.
3. Фомин В.Л. Механика континуума для инженеров. – Л. : ЛГУ, 1975. — 116 с.
4. Павловский В.А. Краткий курс механики сплошных сред. – С-Пб. : СПбГТУРП, 2003. – 212 с.
5. Эртель Г.-м. Путеводитель Прандтля по гидроаэродинамике. – М.: Ижевск : Регуляр. и хаотич. динамика : Ин-т компьютер. исслед., 2007. – 774 с.
6. Павловский В.А., Никущенко Д.В. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы. – СПб. : Лань, 2018 – 368 с.

References

1. Loytsyansky L.G. Mechanics of liquid and gas. M.: Nauka, 1987. – 840 p
2. Astarita G., Marucci G. Principles of non-Newtonian fluid mechanics. McGraw-Hill, 1974. – 289 p.
3. Fomin, V.L. Continuum Mechanics for engineers. L.: Leningrad State University, 1975. – 116 p.
4. Pavlovsky V.A. a Short course in continuum mechanics. SPb.: SPbGTURP, 2003. – 212 p.
5. Oertel-jr H., Prandtl L. Prandtl-Essentials of Fluid Mechanics. Springer, 2010. – 752 p.
6. Pavlovsky V.A., Nikushchenko D.V. Computational Fluid Dynamics.Theoretical foundations. SPb: Lan, 2018 – 368p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Алексеевич Павловский, профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Теплофизических основ судовой энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, 190121, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Valery A. Pavlovsky, professor, Dr. Sci. (Phys & Math), professor of Department of Thermophysical Basis of ship energetics, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya st., 3, St. Petersburg 190121, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Дмитрий Владимирович Никущенко, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры Прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, 190121, e-mail: ndmitry@list.ru

Dmitry V. Nikushchenko, professor, Dr. Sci. (Eng), professor of Department of applied mathematics and mathematical modelling, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya st., 3, St. Petersburg 190121, e-mail: ndmitry@list.ru

УДК 532.582.5
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.041

Метод учета масштабного эффекта для осесимметричных тел при продольном обтекании

А.Ю. Яковлев¹, Тхант Зин¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Учет масштабного эффекта имеет большое значение для задач проектирования судов и их движителей. Сложные формы корпусов судов и современных движителей могут быть представлены в виде комбинации простых базовых элементов, одним из которых является тело вращения. В работе представлен метод учета масштабного эффекта для частного случая тела вращения, обтекаемого в продольном направлении. Метод учета основан на численной оценке обтекания тела вращения с помощью методов идеальной жидкости и расчета пограничного слоя. Расчет пограничного слоя осуществляется путем перехода к плоскому течению. В методе моделируются эффекты ламинарно-турбулентного перехода и отрыва пограничного слоя. Моделирование масштабного эффекта осуществляется путем выбора значений ряда параметров из условия согласования расчета с модельными экспериментальными данными и последующего расчета на большие натурные числа Рейнольдса. Показаны особенности влияния параметров масштабирования на характеристики профиля. Эффективность разработанного метода подтверждена сопоставлением с натурными экспериментальными данными.

Ключевые слова: тело вращения, сопротивление, масштабный эффект, численный метод, ламинарный пограничный слой, турбулентный пограничный слой, ламинарно-турбулентный переход, отрыв пограничного слоя.

Scale effect evaluation method of axisymmetric body in longitudinal flow

Aleksey Yu. Yakovlev¹, Thant Zin¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Taking into account the scale effect is important for the design of ships and its propulsors. Complex shapes of ship hulls and modern propulsors may be represented as a combination of simple basic elements. The axisymmetric body is one of its. The paper presents a method of accounting for the scale effect for the special case of a axisymmetric body in longitudinal flow. The method of accounting is based on the numerical evaluation of axisymmetric body flow using the methods of ideal fluid and boundary layer calculation. The boundary layer calculation realized by moving to the flat flow. The method simulates the effects of laminar-turbulent transition and separation of the boundary layer. Modeling of the scale effect is carried out by selecting the values of a number of parameters from the condition of coordination of the calculation with the model experimental data and the subsequent calculation for large full-scale Reynolds numbers. The features of the influence of scaling parameters on the profile characteristics are shown. The effectiveness of the developed method is confirmed by comparison with the full-scale experimental data.

Key words: axisymmetric body, drag, scale effect, calculation method, laminar boundary layer, turbulent boundary layer, laminar-turbulent transition, boundary layer separation.

Введение

В механике и ряде других наук известна проблема масштабного эффекта. Под масштабным эффектом традиционно понимают различие между безразмерными характеристиками модели и натурального объекта. Причиной возникновения масштабного эффекта является нарушение условий механического подобия. В гидромеханике признаком нарушения подобия служит различие модельных и натуральных чисел подобия. На практике наибольшие сложности вызывает моделирование по числу Рейнольдса и именно с ним связана проблема учета масштабного эффекта.

Корпуса судов, объекты морской техники, их выступающие части и движители, имеют сложную форму, которая, как правило, может быть представлена в виде комбинации простых базовых элементов. Разработав методы учета масштабного эффекта для базовых элементов, в дальнейшем можно развивать методы учета масштабного эффекта для более сложных объектов. В работе [1] был представлен метод учета масштабного эффекта для плоского профиля крыла. В данной работе

рассматривается еще один базовый элемент – тело вращения в случае его продольного обтекания.

1. Постановка задачи

Оценка сопротивления осесимметричных тел при их продольном обтекании в настоящее время может быть успешно выполнена с помощью RANS-методов. Определенные сложности возникают только в случае расчета при больших числах Рейнольдса и, в особенности, при наличии на телах существенных зон отрывного обтекания. Отмеченные сложности, а так же тот факт, что эти методы требуют значительных вычислительных ресурсов и времени, ограничивает их использование при проведении инженерных оценок масштабного эффекта.

В этой связи, в качестве цели работы выступает разработка метода учета масштабного эффекта для осесимметричных тел на основе простых математических моделей, учитывающих ключевые особенности физических явлений. Наличие в этих моделях ограниченного числа свободных эмпирических параметров должно позволить настраивать математическую модель исходя из согласования с имеющимися экспериментальными

данными при модельных числах Рейнольдса и потом проводить расчет для натуральных чисел Рейнольдса.

Число Рейнольдса вводится традиционным образом:

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu} \quad (1)$$

где V_{∞} – скорость набегающего потока, L – длина обтекаемого тела, ν – коэффициент вязкости.

При реализации метода учета масштабного эффекта предполагается, что имеются результаты модельных испытаний при нескольких значениях Re , лежащих в диапазоне $10^4 - 10^6$. На основании этих данных необходимо оценить сопротивление тел при больших числах Рейнольдса, имеющих порядок $10^7 - 10^8$ и выше.

Для упрощенной оценки сопротивления осесимметричных тел в середине XX века был разработан ряд методов, основанных на решении уравнения Кармана для осесимметричного пограничного слоя (ПС).

$$\frac{dS^{**}}{dx} + (2+H) \frac{S^{**}}{V} \frac{dV}{dx} = R \cdot \frac{\tau_w}{\rho V_{\infty}^2} \quad (2)$$

Где x – координата, отсчитываемая вдоль ПС, V – скорость на внешней границе ПС (то есть в области потенциального течения), H – формпараметр, характеризующий отношение толщины вытеснения ПС к толщине потери импульса, $R=R(x)$ – радиус тела вращения, τ_w – касательное напряжение на поверхности тела, ρ – плотность жидкости, S^{**} – площадь потери импульса, которая определяется следующим образом:

$$S^{**} = 2\pi \int_R^{R+\delta} \frac{u}{V_{\infty}} \left(1 - \frac{u}{V_{\infty}}\right) \cdot r dr \quad (3)$$

Где u – продольная компонента скорости в ПС, r – радиальная координата (в цилиндрической системе координат, связанной с телом вращения), δ – толщина ПС.

Площадь потери импульса S^{**} связана с толщиной потери импульса δ^{**} следующим соотношением

$$\delta^{**} \approx \frac{S^{**}}{2\pi R} \quad (4)$$

На практике наиболее популярен подход с расчетом ПС, толщина которого много меньше радиуса тела. Именно этот способ лежит в основе зарубежных инженерных расчетных методов [2], [3]. В отечественной практике Л.Г. Лойцянский был развит метод перехода от ламинарного ПС на теле вращения к расчету плоского ламинарного ПС [4], [5]. Для турбулентного ПС в отечественной практике были разработаны более сложные методы непосредственного решения системы уравнений, описывающих течение в ПС [6], [7]. Наряду с ними, для практического использования, в отечественном судостроении рекомендована эмпирическая формула Шольца [8],

$$C_D = C_{D0} \left[1 + 0,5 \cdot D/L + 3 \cdot (D/L)^3 \right] \quad (5)$$

Где D – максимальный диаметр тела вращения, C_{D0} – коэффициент сопротивления плоской пластины.

Для учета масштабного эффекта необходимо располагать методом, учитывающим особенности ламинарно-турбулентного перехода и включающего ряд физически обоснованных параметров

масштабирования. Формула Шольца (5) не отвечает этим требованиям, а многопараметрические методы расчета ПС, так же как и RANS-методы, имеют излишне большое число настраиваемых параметров.

Ранее был разработан полуэмпирический метод расчета гидродинамических характеристик плоского профиля, позволяющий получать достоверные результаты в широком диапазоне чисел Рейнольдса [9], [10]. Этот метод был успешно применен для обработки и пересчета результатов модельных испытаний на натурные условия [1]. Можно надеяться применить этот метод для расчета сопротивления осесимметричных тел, если воспользоваться переходом от расчета осесимметричного ПС к расчету его плоского аналога [5]. Разработке и апробации такого метода и посвящена данная работа.

2. Метод расчета сопротивления тела вращения

Для расчета сопротивления плоского профиля широко используется формула Сквайра-Юнга [5]. Для осесимметричного течения аналог этой формулы может быть получен на основе закона количества движения, согласно которому сопротивление пропорционально площади потери импульса S^{**} , вычисленной на бесконечности за телом.

Решая, далее, уравнение (2) в области следа за телом, и принимая допущение, что формпараметр H имеет тот же порядок величин, что и в плоском случае, можно получить следующее выражение для сопротивления тела вращения

$$C_D = 2 \cdot \bar{V}_1^{3,5} \cdot \frac{S_1^{**}}{\Omega} \quad (6)$$

Где Ω – характерная поверхность тела (в данной работе $\Omega = \frac{\pi}{4} D^2$), индексом 1 обозначены

характеристики на хвосте тела вращения, чертой сверху здесь и далее обозначается обезразмеривание по скорости набегающего потока.

Аналог формулы (6) в зарубежной литературе известен как формула Янга [11], [12].

2.1. Расчет скорости на внешней границе ПС

Для расчета ПС необходимо знать распределение скорости V вдоль ПС во внешнем потенциальном потоке. Это распределение может быть получено с помощью метода [13]. Данные метод представляет собой метод граничных интегральных уравнений для обтекания осесимметричных тел неоднородным потоком. В качестве неизвестной величины выступает интенсивность потенциала простого слоя, распределенного на поверхности тела вращения.

В качестве примера эффективности данного расчетного метода на рис. 1 приведено сопоставление эпюр коэффициента давления, определенных по методу [13], с данными используемыми в зарубежных расчетах [3]. Коэффициент давления вычислялся стандартным образом: $C_p = 1 - \bar{V}^2$

2.2. Метод расчета ПС

Для моделирования ламинарного ПС на теле вращения в отечественной литературе принято использовать переход к решению задачи для плоского ПС [5]. Задаваясь полуэмпирическими характеристиками течения в турбулентном ПС, можно и в этом случае применить прием перехода к плоскому течению. Данный прием позволяет применить все разработки, сделанные ранее при создании метода учета масштабного эффекта для плоских крыльевых профилей [1], [9], [10], к осесимметричным телам.

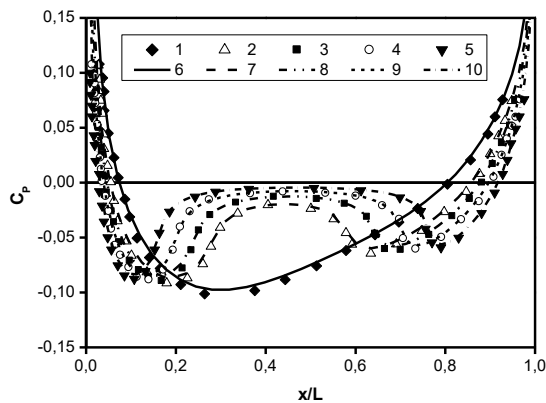


Рис. 1. Сопоставление распределения коэффициента давления на внешней границе ПС, рассчитанного по методу [13] (кривые 6 - 10) с данными использованными в расчетах [3] (точки 1 - 5), для тел вращения семейства 4165 с различной величиной L/D (получаемой за счет цилиндрической вставки): 1, 6 – L/D=7; 2, 7 – L/D=10; 3, 8 – L/D=11,67; 4, 9 – L/D=14; 5, 10 – L/D=17,5.

Расчет течения в ПС будем осуществлять на основе уравнения Кармана (2). Для перехода к решению плоской задачи необходимо произвести замену координат следующего вида

$$\xi = \int_0^x R^{1+m} dx \quad (7)$$

$$\eta = R \cdot y$$

Где ξ и η – координаты, аналогичные введенным ранее координатам x и y , соответствующие плоскому течению, m – параметр, зависящий от вида течения в ПС.

Параметр m изменяется в зависимости от вида течения. В случае ламинарного ПС $m=1$, в соответствии с [5]. Для турбулентного ПС выбор m (и собственно возможность применения такого приема) изначально является полуэмпирическим упрощением. Тем не менее, исходя из модели ПС [5], примем для турбулентного ПС величину $m=1/6$.

После подстановки (7) в (2) и выполнения стандартных преобразований приходим к уравнению для формпараметра f , вид которого аналогичен случаю плоского ПС [5]. Используя известные решения для плоского случая, можно получить следующие соотношения для площади потери импульса S^{**} на теле вращения, в ламинарном:

$$S_L^{**}(x) = \frac{1,34 \cdot \pi}{\sqrt{Re} \cdot |\bar{V}|^{2,67}} \cdot \sqrt{\int_0^x |\bar{V}|^{4,35} R^2 dx} \quad (8)$$

и турбулентном ПС:

$$S_T^{**}(x) = \frac{0,0306 \cdot \pi}{\sqrt[3]{Re} \cdot |\bar{V}|^{3,04}} \times \left(\int_{x_t}^x |\bar{V}|^{3,545} R^{\frac{7}{6}} dx + 15,4 \cdot \sqrt[6]{Re} \cdot \bar{V}_t^{3,55} \cdot \left(S_{L_t}^{**} \right)^{\frac{7}{6}} \right)^{\frac{6}{7}} \quad (9)$$

Где индекс t соответствует точке ламинарно-турбулентного перехода, 0 – передней критической точке, 1 – хвостовой оконечности тела.

Следует отметить, что вблизи хвостовой оконечности тела вращения, там, где его радиус стремится к нулю, переход к плоскому течению становится некорректным и решения (8), (9) теряют свою силу. Однако, в этой области часто уже формируется отрывное обтекание и расчет ПС теряет смысл. Как показали расчеты, при наличии отрыва ПС, величину S^{**} с достаточной для практики точностью можно определять в точке отрыва ПС.

Далее, подставляя (9) в (6) приходим к окончательному выражению для сопротивления тела вращения:

$$C_D = \pi \alpha \frac{0,0306}{\sqrt[3]{Re}} \left(\int_{x_t}^{x_1} |\bar{V}|^{3,545} R^{\frac{7}{6}} dx + 82,4 \cdot \left(\frac{V_t}{Re} \right)^{\frac{5}{12}} \cdot \int_0^{x_t} |\bar{V}|^{4,35} R^2 dx \right)^{\frac{6}{7}} \quad (10)$$

где α – коэффициент зависящий от формы тела и режима его обтекания.

Появление коэффициента α в случае тела вращения связано с тем, что при выводе соотношения (10) на основании (6) и (9) не полностью сокращается скорость на хвостовой оконечности. Теоретически, величина α может быть определена как

$$\alpha = \sqrt{\bar{V}_t} \quad (11)$$

Однако, учитывая возможную погрешность в определении этой скорости, имеет смысл подбирать величину коэффициента α из условия согласования с экспериментальными данными.

Выражение (10) для случая полностью турбулентного ПС согласуется с аналогичными выражениями [12], [14] полученными Гранвиллем и Хессом, а в случае полностью ламинарного ПС совпадает с решением Л.Г. Лойцянского [5].

Координату точки ламинарно-турбулентного перехода x_t , по аналогии с плоским случаем [9], будем определять из условия

$$\ln \left(Re \cdot \bar{V}_t \cdot \bar{\delta}_t^{**} \right) = 18,4 \cdot H_{32} - 21,74 - 0,36 \cdot \rho - \varepsilon^* \quad (12)$$

где ρ – шероховатость поверхности тела, ε^* – параметр, учитывающий характеристики турбулентности потока, $\bar{\delta}_t^{**}$ – толщина потери импульса в точке ламинарно-турбулентного перехода, отнесенная к L , H_{32} – формпараметр.

Для величины H_{32} по аналогии с [9] из условия согласования с экспериментальными данными для осесимметричных тел [15] получено эмпирическое соотношение

$$H_{32} = 1,612 + 50 \cdot f_L - 3,5 \cdot 10^4 \cdot f_L^2 \quad (13)$$

где $f_L = \frac{1,34}{R} \cdot \sqrt{\frac{|\bar{V}'|}{\text{Re}}} \cdot \int_0^x |\bar{V}'|^{4,35} R^2 dx$.

Достоверность моделирования ПС по представленной методике подтверждается хорошим совпадением расчетного распределения толщины вытеснения ПС вдоль тела вращения с экспериментальными данными [16] (приведенными так же в [2]) (рис. 2).

2.3. Моделирование отрывного обтекания

Для осесимметричных тел при их продольном обтекании характерно наличие отрывной области в хвостовой части. Для тел хорошообтекаемой формы эта область имеет крайне малые размеры и может практически отсутствовать. Но в ряде случаев отрывное течение может заметно влиять на величину сопротивления тела вращения. В данной работе не рассматриваются тела плохобтекаемой формы, для сопротивления которых отрывные процессы являются определяющими. Тем не менее, для практических задач важно учитывать влияние на сопротивление тела относительно небольших зон отрывного обтекания.

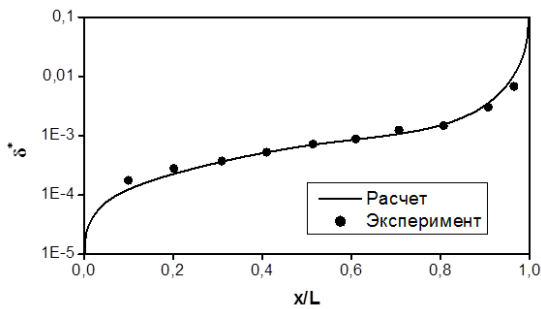


Рис. 2. Сопоставление расчетного и экспериментального распределения толщины вытеснения вдоль тела вращения ZS2G-1 [16].

В качестве критерия отрыва ПС, по аналогии с плоским случаем [9], получаем условия для ламинарного:

$$0,45 \cdot \frac{\bar{V}'(x)}{R^2 \cdot |\bar{V}'(x)|^{5,35}} \int_0^x |\bar{V}'(x)|^{4,35} R^2 dx < f^* \quad (14)$$

и турбулентного ПС:

$$\frac{7}{6} \cdot \frac{\bar{V}'(x)}{R^6 \cdot |\bar{V}'(x)|^{4,54}} \int_0^x |\bar{V}'(x)|^{3,54} R^6 dx < f^* \quad (15)$$

Причем величина f^* для турбулентного ПС принята равной -2, а для ламинарного ПС теоретически невелика (порядка $f^* = -0,07$ [5]), что определяет плохую устойчивость ламинарного ПС к отрыву.

В действительности, отрыв ламинарного ПС происходит более сложным образом. Аналогично [10], считаем, что отрыв ламинарного ПС сопровождается переходом к турбулентному течению и последующим присоединением ПС к поверхности тела, в том случае, если:

$$\frac{1,34}{R} \cdot \sqrt{\frac{|\bar{V}'|}{\text{Re}}} \cdot \int_0^x |\bar{V}'|^{4,35} R^2 dx > f_0^* \quad (16)$$

где f_0^* – эмпирическое значение формпараметра.

Далее будем полагать, что вся поверхность тела ниже по потоку от этой точки охвачена зоной отрывного обтекания с постоянным давлением, равным давлению на внешней границе ПС в точке отрыва. Дополнительно вводится поправка этого давления σ для согласования расчетных оценок с экспериментом.

$$\Delta C_D = \frac{\pi}{\Omega} \int_0^{R_S} \begin{cases} C_P^*, C_P \geq C_P^* \\ 0, C_P < C_P^* \end{cases} \cdot r dr \quad (17)$$

где x_s и R_s – продольная координата и радиус точки отрыва на поверхности тела, $C_P^* = C_P(x_S) + \sigma$

Как уже было отмечено ранее, при наличии отрыва ПС, расчета сопротивления (10) завершается в точке отрыва.

3. Тестирование расчетного метода

Для тестирования и проверки работоспособности представленного метода были выполнены расчеты для ряда тел вращения серии 58 Опытного бассейна им. Давида Тейлора [15]. Все расчеты проводились при одинаковых параметрах: $f_0^* = 0$ и $\epsilon^* = 4,5$. В качестве примера, на рис. 3 представлены расчетная и экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления тел 4154 и 4166 от числа Рейнольдса. На рисунке так же приведены результаты применения формулы Шольца (5). Видно, что на режимах на которых преобладающую роль играет турбулентное течение, разработанный метод дает результат близкий к формуле Шольца. В то же время, формула Шольца не учитывает ламинарно-турбулентный переход, а представленный метод позволяет, при правильно подобранных параметрах, обеспечить хорошее совпадение с экспериментом на всех режимах.

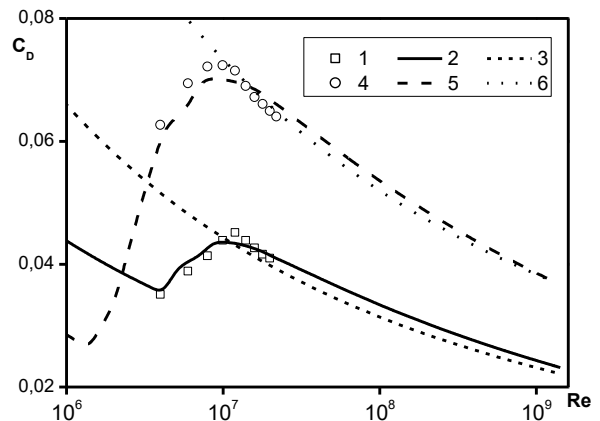


Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных [15] величин C_D в зависимости от числа Рейнольдса для тел вращения 4154 (1- эксперимент, 2 – расчет, 3 – формула Шольца (5)) и 4166 (4 - эксперимент, 5 – расчет, 6 – формула (5)).

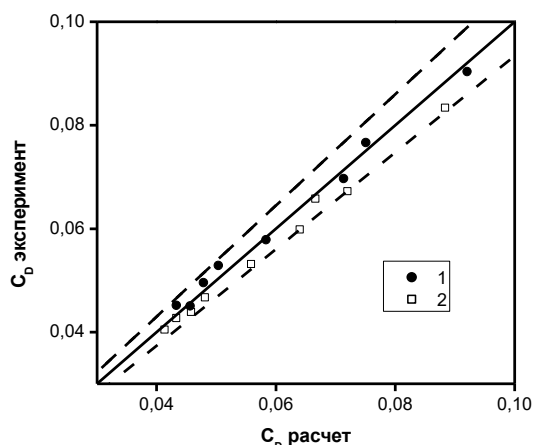


Рис. 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных [15] величин C_D для тел вращения семейства 58. 1 – $Re=2 \cdot 10^7$, 2 – $Re=1,2 \cdot 10^7$. Пунктирными линиями обозначены границы 7% отклонения.

Сопоставление расчетных и экспериментальных оценок для ряда тел семейства 58 приведено на рис. 4 и в табл. 1 при двух значениях числах Рейнольдса. Как видно, результаты расчетных оценок укладываются в 7% коридор погрешности. При этом нужно иметь в виду, что имеет место и погрешность экспериментальных данных, связанная в частности с поправками на сопротивление стоек, которые, для некоторых тел заметно превышали величину сопротивления самого тела.

Таблица 1.

Геометрические параметры, расчетные и экспериментальные [15] величины C_D для тел вращения семейства 58.

№ тела	L/D	Re=2*10 ⁷		Re=1,2*10 ⁷	
		Расчет	Эксп.	Расчет	Эксп.
4154	4	0,0414	0,0404	0,0434	0,0451
4155	5	0,0482	0,0466	0,0504	0,0528
4156	6	0,0559	0,0531	0,0584	0,0578
4157	7	0,0641	0,0598	0,0669	0,6680
4158	8	0,0720	0,0672	0,0751	0,0766
4159	10	0,0884	0,0833	0,0921	0,0903
4166	7	0,0667	0,0657	0,0714	0,0696
4175	5	0,0458	0,0438	0,0479	0,0495
4176	5	0,0434	0,0426	0,0457	0,0450

Помимо тел вращения серии 58, были выполнены расчеты для тел вращения серии 4620 [17] (см. так же [3]). Эта относительно небольшая серия включает тела одинакового удлинения $L/D=11,1$, различающиеся только формой носовой оконечности. Для численного моделирования данной серии, из условия совпадения с экспериментальными данными были выбраны следующие параметры: $f^*_0=0$ и $\epsilon^*=5,5$, $\alpha=0,98$, $\sigma=1$. Таким образом, за счет выбора σ , влияние области отрыва ПС на сопротивление тела считалось пренебрежимо малым. Что касается величины α , то она была определена расчетным путем по формуле

(11). Как следует из хорошего совпадения расчетных и экспериментальных величин сопротивления (рис. 5), используемый метод позволяет учитывать влияние локальных особенностей формы тел вращения на его сопротивление.

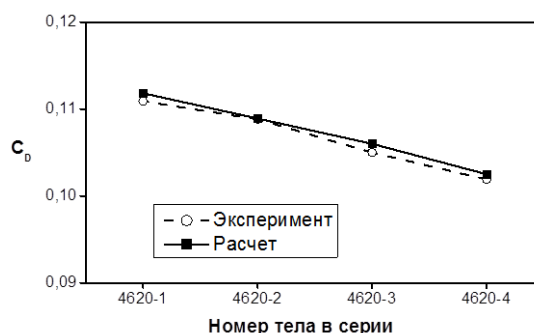


Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных величин C_D для тел семейства 4620 [3]. $Re=2 \cdot 10^7$.

4. Учет масштабного эффекта

Под параметрами масштабирования, как и ранее для профилей [1], понимаются параметры, входящие в представленный выше расчетный метод и определяемые по результатам сопоставления с данными модельных испытаний тел вращения. Как следует из представленного выше описания расчетного метода, к числу таких параметров для тел вращения могут быть отнесены: f^*_0 , ϵ^* , σ и α .

Величины f^*_0 , ϵ^* оказывают влияние на момент наступления ламинарно-турбулентного перехода. Эти величины определяются из условия согласования расчетной зависимости коэффициента сопротивления тела от числа Рейнольдса (10) с экспериментальными данными. В этом случае параметры f^*_0 , ϵ^* косвенно определяют специфику конкретной экспериментальной установки и условий проведения эксперимента. Роль параметра f^*_0 состоит в сглаживании скачка коэффициента сопротивления, а параметр ϵ^* изменяет положение этого скачка. Как и для профилей, параметр ϵ^* может трактоваться как характеристика степени турбулентности потока [1].

Параметр α , как было сказано, учитывает влияние скорости в хвостовой оконечности на сопротивление тела (см. выражение (11)). Чем значительнее скорость отличается от скорости набегающего потока, тем сильнее влияние. Хотя приведенные примеры для тел семейства 4620 показали возможность расчетной оценки этого параметра, тем не менее, проблематично гарантировать точную оценку скорости на внешней границе ПС в хвостовой оконечности тела вращения произвольной формы. Поэтому коэффициент α отнесен к параметрам масштабирования. Тем более, что он, помимо сказанного, может учитывать влияние ряда других факторов.

Роль параметра σ заключается в учете небольших по протяженности областей отрывного течения в хвостовой части тел вращения. Из рассмотренных выше примеров, определенное влияние отрывного обтекания на сопротивление тела отмечено только для тела 4154, имеющего наименьшее удлинение из всех рассмотренных $L/D=4$ (см. табл. 1).

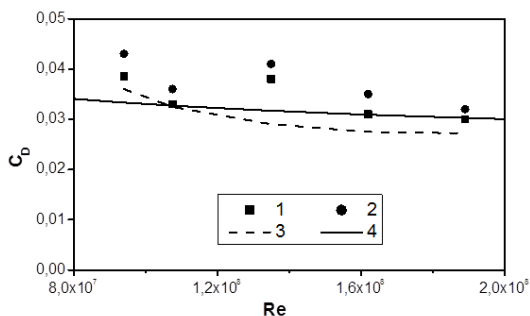


Рис. 6. Сопоставление расчетных и экспериментальных [2] величин C_D для натурального объекта осесимметричной формы (дирижабля ZS2G-1). Экспериментальные оценки: 1 – по мощности, 2 – по следу, 3 – расчет [2], 4 – метод пересчета

В качестве примера учета масштабного эффекта рассмотрим корпус дирижабля ZS2G-1, для которого имеются данные по натурным измерениям сопротивления [16]. Форма дирижабля близка к геометрии модели 4154 58 серии [15]. Это позволяет рассматривать приведенные в [15] данные испытания модели 4154 в качестве модельного прототипа для оценки характеристик натурального дирижабля. Из условий согласования расчетных оценок и результатов модельных испытаний были выбраны следующие параметры масштабирования:

$f^*_0=0$ и $\varepsilon^*=4,5$, $\sigma=0,5$. Коэффициент α определен по формуле (11). На рис. 6 представлены результаты пересчета результатов этих модельных испытаний на натурные характеристики дирижабля ZS2G-1. На том же рисунке приведены расчеты по методике компании Дуглас [2]. Как видно, пересчет обеспечил точное согласование с натурными данными, полученными в натурных условиях на основании измерения мощности двигателя дирижабля [16].

Заключение

Для учета масштабного эффекта при прогнозировании сопротивления тел вращения разработан быстродействующий численный метод, основанный на расчете обтекания тела идеальной жидкостью, анализе течения в ПС и введении системы корректирующих коэффициентов, учитывающих результаты модельных испытаний.

Эффективность разработанного метода учета масштабного эффекта подтверждена путем сопоставления с экспериментальными данными, в том числе при больших (натурных) числах Рейнольдса.

Разработанный расчетный метод так же может использоваться для экспресс-оценки сопротивления хорошообтекаемых тел вращения. По сравнению с формулой Шольца (5) [8] метод позволяет учесть особенности формы тел вращения, наличие ламинарно-турбулентного перехода и отрыва ПС.

Литература

1. Яковлев А.Ю., Тхант Зин Метод учета масштабного эффекта для гидродинамических профилей, Морские интеллектуальные технологии, 1(47), т. 3, 2020, с. 25 – 29.
2. Tuncer Cebeci, G.J. Mosinskis, A.M.O. Smith Calculation of viscous drag and turbulent boundary-layer separation on two-dimensional and axisymmetric bodies in incompressible flows, Report No. MDC J0973-OI, 1970.
3. White N. M. A comparison between a simple drag formula and experimental drag data for bodies of revolution, DTNSRDC report No. 77-0028.
4. Лойцянский Л.Г. Ламинарный пограничный слой на теле вращения // Доклады АН СССР, т. XXXVI, №6, 1942.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – М.: Дрофа, 2003.
6. Амфилофиев В.Б., Дробленков В.В., Мазаева И.И. Интегральный трехпараметрический метод расчета осесимметричного турбулентного пограничного слоя // Труды ЛКИ. Гидромеханика и теория корабля, 1979, с. 3 – 9.
7. Левкович А.К., Ходли Д., Хорлок Дж., Перкинс Х. Семейство интегральных методов для расчета турбулентного пограничного слоя // Ракетная техника и космонавтика, т. 8, № 1, 1970, с. 51 – 59.
8. Справочник по теории корабля: в трех томах. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. / под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985.
9. Яковлев А.Ю., Тхант Зин Расчетно-эмпирический метод оценки сопротивления гидродинамических профилей в широком диапазоне чисел Рейнольдса, Морские интеллектуальные технологии, 2(44), т. 1, 2019, с. 21 – 25
10. Яковлев А.Ю., Тхант Зин Полуэмпирический метод оценки характеристик гидродинамических профилей // Морские интеллектуальные технологии, № 4, т. 1, 2019, с. 29 - 33.
11. Young, A.D. The Calculation of the Total and Skin Friction Drag of Bodies of Revolution at Zero Incidence, Aeronautical Research Committee R&M Report No. 1874, 1939.
12. Granville, P.S. Partial Form Factors from Equivalent Bodies of Revolution for the Froude Method of Predicting Ship Resistance, SNAME First Ship Technology and Research Symposium, Washington, D.C., 1975.
13. Бушковский В. А., Яковлев А. Ю. Метод граничных элементов для расчета обтекания тел, имеющих осевую симметрию // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, вып. 36(321), 2008, с.187-200.
14. Hess, John L. On the Problem of Shaping an Axisymmetric Body to Obtain Low Drag at Large Reynolds Numbers, Journal of Ship Research, Vol. 20, No. 1, 1976.
15. Gertler, Morton Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution - For Application to the Design of High-Speed Submarines, David Taylor Model Basin Report C-297, 1950.
16. Cornish, J.J., III; and Boatwright, D.W. Application of Full Scale Boundary-Layer Measurements to Drag Reduction of Airships, Aerophysics Dept., Mississippi State University Research, Rept No. 28, 1960.
17. McCarthy, J.H., J. Power, and T.T. Huang The Roles of Transition, Laminar Separation and Turbulence Stimulation in the Analysis of Axisymmetric Body Drag, Proceedings of the Eleventh ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, London, 1, Mar 1976.

References

1. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Metod uchjota mashtabnogo effecta dlja gidrodinamicheskikh profiley [Scale effect evaluation method of hydrofoil sections], Marine intellectual technology, 1(47), vol. 3, 2020, pp. 25 – 29.
2. Tuncer Cebeci, G.J. Mosinskis, A.M.O. Smith Calculation of viscous drag and turbulent boundary-layer separation on two-dimensional and axisymmetric bodies in incompressible flows, Report No. MDC J0973-OI, 1970.
3. White N. M. A comparison between a simple drag formula and experimental drag data for bodies of revolution, DTNSRDC report No. 77-0028.
4. Loytsansky L.G. Laminarniy pogranchniy sloj na tele vraschenija [Laminar boundary layer on body of revolution], Reports of USSR Academy of science, vol. XXXVI, No. 6, 1942.
5. Loytsansky L.G. Mehanika zidkosti I gaza: utchebnik dlya vuzov [Fluid and gas mechanics: textbook for universities], Moscow, "Drofa", 2003.
6. Amfilohiev V.B., Droblenkov V.V., Mazaeva I.I. Integralniy trijohparametricheskij metod raschjota osesimmetrichnogo turbulentnogo pogranchnogo sloja [Integral three-parametric calculation method of turbulent axisymmetric boundary layer], Transactions of Leningrad shipbuilding institute. Hydromechanics and marine engineering, 1979, pp. 3 – 9.
7. Levkovich A.K., Hodly D., Horlok J., Perkins H. Semeystvo integralnyh metodov dlja raschjota turbulentnogo pogranchnogo sloja [The set of integral methods for turbulent boundary layer calculation], Rocket technic and astronautics, vol. 8, No. 1, 1970, pp. 51 – 59.
8. Vojtkunsky Ya. I. Spravochnik po teorijj korablya [Handbook on the marine engineering], vol. 3, Leningrad, Sudostrojenije, 1985.
9. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Raschetno-empiricheskiy metod otsenki soprotivleniya gidrodinamicheskikh profiley v shirokom diapazone chisel Reynoldsa [Numerical-empirical evaluation method of hydrofoil sections drag in wide range of reynolds number], Marine intellectual technology, 2(44), vol.1, 2019, pp. 21 – 25.
10. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Poluempiricheskiy metod otsenki harakteristik gidrodinamicheskikh profiley [Numerical-empirical evaluation method of hydrofoil sections characteristics], Marine intellectual technology, 4(46), vol.1, 2019, pp. 29 – 33.
11. Young, A.D. The Calculation of the Total and Skin Friction Drag of Bodies of Revolution at Zero Incidence, Aeronautical Research Committee R&M Report No. 1874, 1939.
12. Granville, P.S. Partial Form Factors from Equivalent Bodies of Revolution for the Froude Method of Predicting Ship Resistance, SNAME First Ship Technology and Research Symposium, Washington, D.C., 1975.
13. Boushkovsky V.A., Yakovlev A. Yu. Metod granichnih elementov dlja raschjota obtakanija tel imejuschi osevuju simmetriyu [Boundary elements method for calculation of axisymmetric bodies flowing], Transactions of Krylov shipbuilding research centre, vol. 36(321), 2008, pp.187-200.
14. Hess, John L. On the Problem of Shaping an Axisymmetric Body to Obtain Low Drag at Large Reynolds Numbers, Journal of Ship Research, Vol. 20, No. 1, 1976.
15. Gertler, Morton Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution - For Application to the Design of HighSpeed Submarines, David Taylor Model Basin Report C-297, 1950.
16. Cornish, J.J., III; and Boatwright, D.W. Application of Full Scale Boundary-Layer Measurements to Drag Reduction of Airships, Aerophysics Dept., Mississippi State University Research, Rept No. 28, 1960.
17. McCarthy, J.H., J. Power, and T.T. Huang The Roles of Transition, Laminar Separation and Turbulence Stimulation in the Analysis of Axisymmetric Body Drag, Proceedings of the Eleventh ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, London, 1, Mar 1976.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Юрьевич Яковлев, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Aleksey Yu. Yakovlev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Head of Hydrodynamic and marine acoustic department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

Тхант Зин, аспирант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Thant Zin, Postgraduate student of Hydrodynamic and marine acoustic department, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.543:629.5.023

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.024

Нормативно-методические основы проектирования поперечных танкерных рам в грузовой части современных крупнотоннажных нефтеналивных судов

К.В. Плотников¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Статья посвящена вопросам проектирования поперечных танкерных рам крупнотоннажных нефтеналивных судов, размеры корпусных конструкций которых должны соответствовать требованиям Общих Правил МАКО (CSR). Требования Правил CSR можно разделить на общие нормативные предписания аналитико-эмпирического характера (prescriptive-требования) и требования к выполнению проверочных расчётов (в первую очередь с использованием МКЭ). В работе рассмотрены алгоритмы проектирования поперечных рам нефтеналивных судов в соответствии с prescriptive requirements, а также предложена методика и алгоритм проектирования таких конструкций, включающие и МКЭ-анализ, которые могут использоваться в практике конструкторских бюро. Приведено обоснование необходимости анализа и обобщения проектных решений в части рамных конструкций на реальных судах, которые могут быть использованы при разработке специализированного программного обеспечения. Поскольку напряжённо-деформированное состояние рамной конструкции зависит от соотношения характеристик изгибной жесткости составляющих её балок, целесообразным является построение алгоритма проектирования, частью которого является решение оптимизационно-поисковой задачи определения требуемых размеров конструкции. Ограничения такой задачи должны формироваться на основе общих требований CSR. В тексте приведено описание нормативных требований и основные их особенности. Кратко описаны возможные варианты постановки задачи и соображения о программной реализации её решения.

Ключевые слова: алгоритм проектирования, проектирование конструкций, конструкция корпуса судов, нефтеналивные суда, обзор, Общие Правила МАКО, оптимизационно-поисковая задача, поперечные рамы, танкерные рамы, танкер, CSR

Normative and methodological principles for transverse webs structural design as applicable to cargo tank area of double hull oil tankers

Kirill V. Plotnikov¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The paper deals with principal considerations of double-hull oil tankers primary supporting members (PSM) structural design, which meets the requirements of Common Structural Rules (CSR). The algorithms of structural design procedure for different typical arrangements of tankers are considered in the paper. The study shows main features of structural design process that lead to complexity of functional relations. As CSR requirements consist of prescriptive requirements and direct analysis requirements (that usually means finite element analysis) the suggested algorithms include both of these stages. The text explains the need of statistical data of existing designs collecting. Such data includes ratios between required and actual web depths, scantlings of brackets, ratios between moments of inertia of PSM and some others. This data can be used in structural design process and form the limitations of design parameters. As shear forces and bending moments in primary supporting members depend on ratios of its bending stiffness and relation between design parameters are rather complicated it is appropriate to use mathematical programming models, which present a decision support instrument. There are many ways of formulation and implementation of structural design task, and the paper gives general considerations about it. The brief review of previous contributions on this subject is also given.

Key words: algorithm, Common Structural Rules, CSR, oil tankers, primary supporting members, review, rules requirements, ship structural design, ship structure, transverse web

Введение

Размеры конструкций корпуса танкеров длиной 150 м и более и балкеров длиной 90 м и более регламентируются требованиями Общих Правил МАКО по конструкции и прочности навалочных и нефтеналивных судов (далее, если дополнительно не указано – Правила) [1]. При этом требования этого документа касаются как определения размеров конструкций на основе относительно простых предварительных рекомендаций (предписаний) (prescriptive-требований), так и верификации полученных размеров с использованием проверочных расчётов прочности по МКЭ. Характерной особенностью конструкции корпуса

нефтеналивных судов в средней части является наличие поперечных замкнутых рам. *Поперечная танкерная рама* – совокупность рамных балок, входящих в состав днищевых, бортовых, палубных конструкций и конструкций продольных переборок, расположенных в одной поперечной плоскости, объединённых (перевязанных) при помощи книц (бракет), распорок в единую кольцевую структуру.

Проверочный расчёт рамных конструкций с известными размерами конструктивных элементов может быть реализован достаточно просто при наличии соответствующего программного обеспечения и вычислительной техники. Параметрическое проектирование новых

конструкций¹ (задача проектанта – специализированного КБ) – это решение значительно более сложной обратной задачи, которая требует разработки специализированных алгоритмов и программного обеспечения, внедрение которых позволит повысить эффективность принятия проектных решений и обеспечит возможность многовариантного анализа проектируемой конструкции.

Структурная схема танкерной рамы связана с архитектурно-конструктивной компоновкой корпуса судна в районе грузового танка. Правила [1] регламентируют требования к шести конструктивным вариантам танкерных рам, применяемых в средней части нефтеналивных судов различных архитектурно-конструктивных типов (см. рис.1).

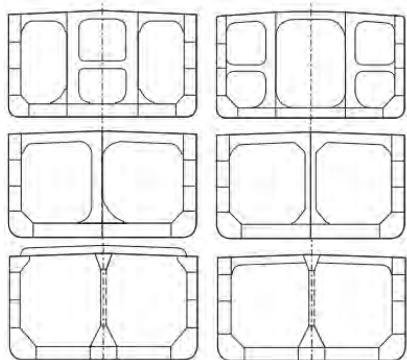


Рис. 1. Возможные схемы компоновки поперечного сечения современных крупнотоннажных нефтеналивных судов [1]

Варианты компоновки поперечного сечения, представленные на рис. 1, определяются следующими факторами (см. рис.2):

- количеством продольных переборок (одна или две);
- конструктивным типом продольной переборки (плоская или гофрированная);
- расположением рамных бимсов (сверху или снизу палубного настила);
- наличием и расположением распорок (распорка в центральном танке, распорки в бортовых танках);
- конфигурацией рамных стоек продольных переборок (рамная стойка в одном из бортовых грузовых танков или симметричная относительно ДП).

Следовательно, поперечные танкерные рамы объединяют элементы различных структурных составляющих (перекрытий) корпуса судна и, в общем случае, могут состоять из флоров, вертикальных диафрагм двойного борта, рамных бимсов, рамных стоек продольных переборок и распорок.

Принципы декомпозиции корпуса судна на структурные составляющие, предложенные в [3], позволяют представить любую конструкцию в кодированном виде (в виде кодовой модели).

Особенности компоновочной схемы танкерной рамы обуславливает высокую степень сложности кодовой модели танкерной рамы, а, следовательно, и алгоритмов ее проектирования. Структурная декомпозиция и кодировка рамных балок, входящих в рассматриваемую раму разработана (обоснована) в рамках НИР, выполненных в СПбГМТУ по заказу Главного управления Российского морского регистра судоходства (РС).

В связи с этим, задачи параметрического проектирования элементов танкерных рам будут существенно отличаться от типовых задач параметрического проектирования элементов конструкций, входящих в состав какой-то одной структурной составляющей, как по постановке, так и по степени сложности. В данной статье обсуждаются общие положения, касающиеся процесса параметрического проектирования поперечных танкерных рам на основе требований Правил. Представленные материалы подготовлены с целью сформулировать основные направления исследований в данной области, кратко обобщить имеющийся опыт и обосновать актуальность разработки алгоритмов проектирования танкерных рам с учётом требований Общих Правил, пригодных для создания специализированного программного обеспечения.

1. Особенности требований Общих Правил МАКО

Основные *prescriptive*-требования Правил² к размерам поперечных танкерных рам – это требования к минимальным толщинам стенок и поясков, требования к местной устойчивости стенок и поясков (в виде требований к соотношению их размеров), требования к минимальной высоте стенок рамных связей (для рамных бимсов и рамных стоек продольных переборок), требования к прочности на сдвиг (в виде нормирования площади стенок балок), требования к прочности на изгиб (только для рамных бимсов и рамных стоек продольных переборок). Для рамных бимсов дополнительно нормируется минимальный момент инерции из условия устойчивости перекрытия. Размеры элементов распорок регламентируются требованиями к устойчивости.

При проектировании конструкций поперечных танкерных рам в соответствии с требованиями Правил существует целый ряд особенностей, существенно отличающих эту задачу от проектирования по требованиям Правил РС. Общие Правила принципиально разработаны в предположении, что расчёты будут проводиться в специализированном программном обеспечении (ПО). Это подтверждается практикой работы зарубежных классификационных обществ и проектных организаций. Ниже рассмотрены факторы, которые приводят к достаточно сложной логике программного кода при проектировании рамных конструкций.

Прежде всего, следует отметить трудоёмкую процедуру определения эффективного пролёта

¹ Параметрическое проектирование конструкций – это процесс определения размеров элементов конструкции, удовлетворяющих требованиям нормативных документов (Правил классификационных организаций/ Норм прочности) [2].

² В данной статье основное внимание уделено именно *prescriptive*-требованиям, краткое описание особенностей требований к проверочным расчётам по МКЭ приведено в [4].

балок, составляющих раму, при работе на изгиб и сдвиг. Эффективным называется фактический геометрический пролет, уменьшенный за счет учета влияния подкреплений в опорных сечениях на работу рамной балки, что допускается Правилами классификационных обществ. Переменная

жёсткость балок по пролету, возникающая за счёт наличия опорных книц больших размеров в узлах соединения балок между собой, значительно влияет на значения расчётных изгибающих моментов и перерезывающих сил в элементах рамы.



Рис. 2. Факторы, влияющие на формирование компоновочной схемы поперечной танкерной рамы

Алгоритм определения эффективных пролётов рамных связей по требованиям Общих Правил имеет следующие особенности (рис. 3):

- значение расчётного пролёта различно в формулах для определения момента сопротивления поперечного сечения и площади, поперечного сечения, работающей на срез – в Правилах используются понятия «эффективного изгибающего пролёта» (*effective bending span*) и «эффективного сдвигового пролёта» (*effective shear span*);

- вводится понятие «эффективного катета кницы»; значение «эффективного» катета определяется путём мысленной замены рассматриваемой кницы вписанным треугольником с соотношением сторон 1:1,5;

- расчётный пролёт балки при нормировании требуемого момента сопротивления измеряется между точками пересечения прямой, параллельной свободному пояску балки и отстоящей от него на 1/4 (либо 1/2) высоты стенки балки, и линии свободной кромки кницы, или гипотенузы вписанного треугольника;

- на величину пролёта может влиять наличие «обратной» кницы (*back bracket*), т.е. кницы, расположенной с обратной стороны обшивки, к которой приварена рассматриваемая рамная балка;

- диафрагмы под наклонным настилом крыши скуловой цистерны и другими аналогичными конструкциями рассматриваются как опорная кница.

Учитывая вышесказанное, определение расчётных пролётов балок при наличии книц подразумевает решение тривиальной, но сравнительно трудоёмкой (по крайней мере, для книц с лекальной кромкой) задачи аналитической геометрии. Были разработаны алгоритмы и программные коды определения эффективных пролётов рамных связей для различных типов опорных книц, реализованные при создании ПО «ATLAS» по заказу ГУ РС [5]. Созданное программное обеспечение предполагается включить

в состав ПО для автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна, разрабатываемого по заказу одного из конструкторских бюро.

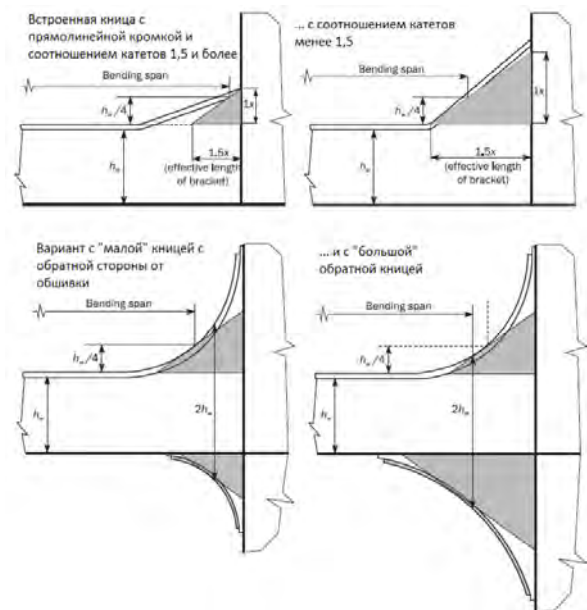


Рис. 3. Примеры схем из [1], описывающих процесс редуцирования пролёта

В рамках постановки задачи проектирования поперечных танкерных рам влияние наличия опорных книц приводит к усложнению взаимосвязи между расчётными параметрами. Данный факт обусловлен тем, что эффективная ширина присоединённого пояска, минимальная высота стенки рамной балки, требуемая из условия жёсткости, величина расчётного давления являются неявными функциями от параметров книц и, следовательно, фактических (искомых) размеров

балок. Очевидно, что решение задачи при этом значительно усложняется.

Особенностью Правил является необходимость анализа большого числа расчётных случаев нагружения конструкций. В общем случае расчётный вариант нагрузки (*design load set*) определяется сценарием работы судна, условиями его загрузки, учитываемыми составляющими (только статические – вариант «S» или с учётом инерционных составляющих «S+D»), различными вариантами положения судна относительно эквивалентного расчётного волнения (*EDW, equivalent design wave*). Данный вопрос рассмотрен как в публикациях, посвящённых разработке Общих Правил МАКО, так и в работах, касающихся различных аспектов проектирования конструкций в соответствии с этим нормативным документом (например, [5, 6, 7]). Применительно к конструкциям поперечных танкерных рам расчётные варианты их загрузки указаны в Pt.2 Ch.2 Sec.3 1.2.1 Правил. Для большинства балок в составе рамы, как правило, нельзя заранее сказать, какой вариант нагрузки окажется определяющим, т.е. необходимо получить требуемые характеристики балок для каждой рассматриваемой нагрузки, а затем выбрать наибольшие. Этот факт также заметно усложняет алгоритм, однако, будучи запрограммированным в виде набора процедур не является проблемой. Для задачи проектирования значительно более сложная проблема связана с тем, что положение точек, в которых требуется определение нагрузок, зависит от размеров проектируемых балок и опорных книц, т.е. значения нагрузок не являются постоянными и изменяются от итерации к итерации при решении задачи.

Для балок, составляющих раму, Правила позволяют определить требуемые характеристики балки в любом поперечном сечении пролёта за счёт регламентации эпюр распределения коэффициентов изгибающих моментов и перерезывающих сил. Это удобно при выполнении проверочного расчёта, однако на ранних стадиях проектирования конструкций поперечных рам их подробная топология неизвестна. По этой причине при постановке задачи в рамках Правил требуется заранее задать неким условным положением расчётных сечений, в которых будут определяться размеры балок, а затем уточнять их в процессе реализации итерационных процедур.

Важным аспектом требований Общих Правил МАКО является «нетто-подход» (*net scantling approach*), сущность которого заключается в том, что нормируемые размеры конструкций соответствуют толщинам, уменьшенным на полную величину коррозионной добавки (размеры «*net*») или на 50% этой величины (размеры «*net 50*»). В основном, указания о том, какое «уменьшение толщины» заложено при нормировании размеров по различным критериям, представлены в таблице 1 в разделе CSR Pt.1, Ch.3, Sec.2, 1.3.2. Требования к минимальным толщинам и устойчивости связей поперечных танкерных рам заданы относительно толщин «*net*», а требования к местной прочности – «*net 50*».

Очевидный факт зависимости напряженно-деформированного состояния рамной конструкции от соотношения характеристик изгибной жёсткости составляющих её балок в CSR Prescriptive

реализован при определении требуемого момента сопротивления рамного бимса. Вводятся коэффициенты β_{st} и β_{vw} , зависящие от соотношений пролетов и моментов инерции:

$$\beta_{st} = 0,9 \cdot \left(\frac{l_{bdg-st}}{l_{bdg-dt}} \right) \left(\frac{l_{dt-n50}}{l_{st-n50}} \right), \quad 0,1 \leq \beta_{st} \leq 0,65; \quad (1)$$

$$\beta_{vw} = 0,9 \cdot \left(\frac{l_{bdg-vw}}{l_{bdg-dt}} \right) \left(\frac{l_{dt-n50}}{l_{vw-n50}} \right), \quad 0,1 \leq \beta_{vw} \leq 0,5, \quad (2)$$

где l_{dt-n50} , cm^4 – значение момента инерции «*net 50*» поперечного сечения с присоединённым пояском для рамного бимса; l_{st-n50} , cm^4 и l_{vw-n50} , cm^4 – значения моментов инерции «*net 50*» поперечного сечения с присоединённым пояском в середине пролёта для вертикальной диафрагмы двойного борта и рамной стойки продольной переборки соответственно; l_{bdg-st} , l_{bdg-dt} , и l_{bdg-vw} , м – эффективные изгибные пролёты, соответственно, для вертикальной диафрагмы двойного борта, рамного бимса и рамной стойки продольной переборки.

2. Использование существующих проектных решений

При постановке задачи проектирования конструкций поперечных танкерных рам уделялось внимание её практической ориентированности. Интерес представляет анализ некоторых конструктивных решений, применённых на существующих наливных судах, с целью определения характерных диапазонов варьирования конструктивных параметров. Кроме того, данные по конструкциям судов-прототипов позволяют верифицировать решения, получаемые в процессе проектирования. Некоторые соображения, касающиеся указанного анализа, представлены ниже.

Алгоритм проектирования поперечных танкерных рам несколько отличается для судов различных архитектурно конструктивных типов (см. рис.1). Для удобства анализа можно отдельно рассматривать четыре группы. Первая – это танкеры с двумя продольными переборками, вторая – суда с одной плоской переборкой в ДП, у которых рамная стойка продольной переборки полностью размещается в одном из грузовых танков. Третья группа включает суда с одной переборкой в ДП, у которых рамная стойка размещена симметрично в грузовых танках левого и правого борта. Четвёртая группа – танкеры с продольной гофрированной переборкой, имеющей вертикальную ориентацию гофров.

Наиболее интересен с позиций построения алгоритма проектирования рам анализ следующих данных по судам-прототипам:

- соотношение расстояний между опорными конструкциями и эффективными пролетами балок;
- значения соотношений принятых высот стенок балок и минимальных, требуемых Правилами h_{w-act} / h_{w-min} ;
- типы и относительные размеры параметров опорных книц (соотношения между высотами рамных балок и катетами книц, а также радиусами скруглений свободной кромки каждой кницы);

– соотношения между моментами инерции балок, образующих раму; наиболее интересны такие соотношения для рамных бимсов и смежных им балок. Значения коэффициентов β , определяемые по формулам (1) и (2), также представляют практический интерес;

– соотношения между фактическими моментами инерции рамных балок и значениями моментов инерции, соответствующими минимальным размерам по Правилам;

– коэффициенты утилизации площади сечения балок A_{n50} по моменту сопротивления Z_{n50} (требуемому и фактическому)

$$C_w = A_{n50} / (Z_{n50})^{2/3}$$

и фактическому моменту инерции I_{n50}

$$C_l = A_{n50} / \sqrt{I_{n50}};$$

– характеристики массы (объёма материала) поперечной рамы;

– вариант расчётной нагрузки, определяющий наибольшие требуемые размеры для различных балок.

Такие данные в настоящее время накапливаются и систематизируются в процессе обработки проектных материалов по современным двухкорпусным нефтеналивным судам в диапазоне дедевейта от 17 до 300 тыс. т.

3. Итерационный алгоритм проектирования

Рассмотрим алгоритм наиболее трудоемкой процедуры проектирования поперечной танкерной рамы нефтеналивного судна с двумя продольными переборками. Базируясь на принципах системного подхода, может быть предложена декомпозиция решения общей задачи на три этапа: (рис. 4): проектирование вертикальной диафрагмы двойного борта и рамного бимса бортового танка - *Задача 1*, проектирование рамного бимса и рамной стойки в центральном танке³ – *Задача 2* и проектирование поперечного рамного междулонного набора (сплошного флора) – *Задача 3*.

Указанные задачи в той или иной степени взаимосвязаны. Так, минимальная высота рамного бимса в центральном танке не должна быть менее 90% высоты рамного бимса в бортовом танке, а ближайшая к ДП опорная кница рамного бимса бортового танка может влиять на величину пролёта (см. рис. 2) рамной стойки в центральном танке. На расчётный пролёт сплошного флора оказывает значительное влияние размеры нижних опорных книц рамной стойки продольной переборки. По этой причине необходимо придерживаться определённого порядка проектирования-

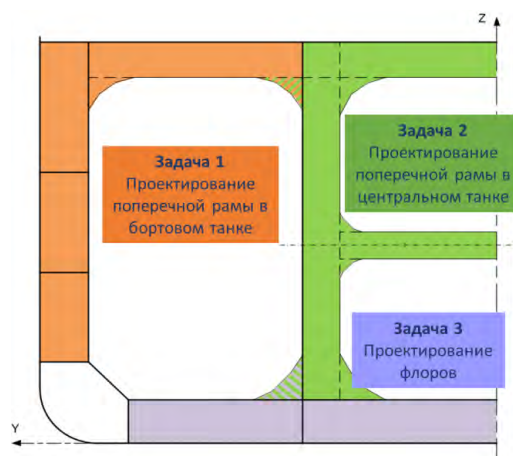


Рис. 4. Задачи/этапы проектирования конструкций поперечной рамы танкера в грузовой части

В соответствии с методологией параметрического проектирования, предложенной в работе [3] и реализуемой в рамках решения данной задачи, к началу этапа проектирования поперечных танкерных рам должна быть известна компоновочная схема корпуса в районе грузовых танков – выбраны системы набора конструкций, положение балок основного и рамного набора. Должны быть также получены результаты предшествующего этапа проектирования: толщины обшивок и настилов, а также размеры продольных балок основного набора в рассматриваемом районе, регламентируемые требованиями к местной прочности, устойчивости и общей продольной прочности. Решение о выборе предела текучести материала конструкций принимается либо на основе практических соображений, либо устанавливается в процессе проектирования конструкций.

Общепроектные параметры такие, как ширина бортового танка B_2 , ширина центрального танка B_1 , высота второго дна и ширина двойного борта, аппликата верхней палубы относительно линии настила второго дна в ДП D_2 , геометрия крыши скуловой цистерны («хоппера») считаются заданными величинами, поскольку устанавливаются еще на более ранних этапах проектирования.

Для решения задачи проектирования поперечных танкерных рам могут быть предложены два метода: использование итерационной поисковой процедуры, постановка и решение задачи математического программирования. На завершающем этапе, после окончательного выбора параметров составляющих поперечной рамы необходимо выполнить проверочный расчет конструкции для того, чтобы убедиться, что все требования Правил не нарушены. Правилами регламентируется также последующий анализ прочности конструкции с использованием МКЭ для уточнения напряженно-деформированного состояния и оптимизации распределения материала.

³ Задачи проектирования рамных балок бортового или центрального танка могут включать в себя задачу проектирования распорки

Методические основы обоих методов параметрического проектирования поперечных танкерных рам на основе prescriptive-требований общих Правил МАКО были разработаны и апробированы применительно к конструкциям корпуса крупнотоннажного танкера типа VLCC. В настоящий момент выполняется отработка алгоритма проверочного расчета танкерных рам на основе анализа по МКЭ с учетом рекомендаций Правил.

Алгоритм итерационной процедуры может быть представлен следующим образом:

1). Выбор минимальных размеров балок рамного набора.

Минимальная высота рамных балок регламентируется условиями жесткости (см. пп. 1.5.1 и 1.7.1 Pt.2, Ch.2, Sec.3 Правил [1]). Толщина стенки должна быть не меньше максимальной из двух величин: минимальная толщина, толщина, требуемая из условия устойчивости стенки при заданной схеме подкрепления. Минимальные размеры свободного пояса на данном этапе: толщина равна принятой толщине стенки; ширина пояса при заданной толщине регламентируется условием местной устойчивости (*slenderness*).

Учитывая рекомендации Правил, касающиеся минимальных размеров книц, соединяющих рамные балки, можно оценить величину пролетов балок, а, следовательно, затем и параметры присоединенного пояса.

2). Определение момента инерции поперечного сечения рамного бимса в центральном и бортовом танках при принятых минимальных значениях параметров поперечного сечения. Проверка соответствия момента инерции требуемому значению из условия устойчивости перекрытия. Если момент инерции поперечного сечения рамного бимса меньше требуемой величины, то необходимо откорректировать начальные значения размеров балки. Для этого решается задача подбора профиля минимальной площади под заданное значение момента инерции с учетом ограничений на параметры стенки и свободного пояса.

3). Определение требуемых значений моментов сопротивления и площади поперечного сечения балок из условия поперечной прочности

При заданных значениях параметров профиля балок и размерах присоединенного пояса фактические значения площади стенки и минимального момента сопротивления определяются известными зависимостями. Расчетные изгибающие моменты и перерезывающие силы, входящие в условия поперечной прочности Правил, могут быть определены, поскольку известны пролеты балок и моменты инерции сечения, определяющие значения параметров относительной жесткости балок танкерной рамы – параметры относительной жесткости вертикальной диафрагмы двойного борта и рамного бимса в бортовом танке (1), и параметр относительной жесткости рамной стойки продольной переборки и рамного бимса в центральном танке (2).

Если требуемые значения превосходят фактические при принятых на данном этапе размерах, то условия поперечной прочности не выполняются и необходимо откорректировать параметры профиля рамных балок: увеличить

высоту и (или) толщину стенки, ширину и (или) толщину свободного пояса. Это значит, что надо вернуться к п.1 алгоритма и повторить все последующие процедуры.

Окончательно принятые размеры поперечного сечения балок должны удовлетворять условиям поперечной прочности при соответствии параметров относительной жесткости, которые использовались для определения расчетных изгибающих моментов.

Эффективность предложенного алгоритма итерационной поисковой процедуры может быть значительно увеличена, если в качестве начальных значений принимать не минимально возможные параметры рамных балок, а вытекающие из анализа и обобщения данных по судам – прототипам (см. второй раздел данной статьи).

4. Использование поисковых процедур

В результате решения задачи рассмотренным методом будут получены конструкции, удовлетворяющие prescriptive-требованиям Правил, но не известно, насколько они будут оптимальны, например, по критерию минимума массы. Постановка проблемы в виде оптимизационно-поисковой задачи математического программирования может исключить указанный недостаток.

В общем виде такая задача представляется следующим образом: минимизировать целевую функцию (ФЦ) $GF(X)$ вектора варьируемых переменных $X = \{x_i\}^T$ при следующих ограничениях в виде равенств, неравенств, а также ограничениях на область допустимых значений варьируемых параметров:

$$\begin{aligned} h_j(X) &= 0, \quad j = 1, \dots, k_h, \\ g_j(X) &\geq 0, \quad j = 1, \dots, k_g, \\ X_{\min} &\leq X \leq X_{\max}. \end{aligned} \quad (3)$$

Функцию $GF(X)$ в контексте проектирования рамной конструкции удобно представить в виде характеристики массы (объёма) материала, хотя могут быть предложены и другие, более сложные её представления.

Использование в качестве варьируемых параметров непосредственно размеров сечений балок, образующих раму, может приводить к чрезмерному усложнению задачи (каждое расчётное сечение соответствует, по крайней мере, 4-м параметрам). Использование хорошо зарекомендовавших себя методов решения задач нелинейного программирования (см., например, [3, 8, 9]) в этом случае затруднительно в силу проблемы поиска глобального экстремума функции большего числа переменных. Так, при решении оптимизационно-поисковой задачи проектирования поперечных гофрированных переборок с использованием надстройки Solver в Microsoft Excel [11] регулярно наблюдалась зависимость получаемого решения от варианта начального приближения, т.е. получение решения, соответствующего локальному минимуму ФЦ (варьировалось до девяти расчётных параметров, число ограничений – более 30-ти).

Одним из возможных путей решения является использование современных стохастических алгоритмов с одновременным поиском решения

сразу по всей области. К ним относятся как алгоритмы, основанные на различных вариациях метода Монте-Карло, так и эвристические алгоритмы поиска: генетические алгоритмы, метод «роя частиц», алгоритмы «пчелиной колонии», и многие другие [12,13]. Отметим, что само по себе использование стохастических алгоритмов не гарантирует нахождение глобального минимума ФЦ и требует дополнительных исследований по подбору параметров поиска, размера начальной популяции и т.д. В то же время подобный подход даёт возможность для дискретизации области поиска.

В работе [14] показана возможность постановки задачи проектирования поперечной танкерной рамы одновременно в бортовом и центральном танках и её решения с использованием поискового алгоритма «роя частиц». Число варьируемых параметров составило 101, ограничений – 83. Несмотря на принципиальную возможность такой постановки задачи требуются дополнительные исследования для оценки чувствительности ФЦ к варьируемым параметрам [9,10], что может значительно упростить и ускорить решение, а также облегчить анализ результата.

Достаточно эффективный подход – использование в качестве параметров проектирования характеристик поперечного сечения балок [3, 9], что требует декомпозиции решения задачи на два уровня. В работе [15] в качестве варьируемых параметров приняты относительные значения моментов инерции сечений балок, образующих раму. ФЦ – характеристика массы поперечной рамы. Ограничения задачи формируются на основе требований Правил. В рамках требований Правил невозможно записать ограничения задачи в виде аналитических зависимостей. Поэтому процедуру проектирования поперечной танкерной рамы, реализованную в виде программного кода, придется использовать в итерационных циклах при решении задачи математического программирования. В работе [15] показано, что ФЦ и ограничения задачи с достаточной точностью могут быть представлены регрессионными моделями второго порядка, а полученные в результате проектирования параметры конструкции близки к реальным проектным значениям.

Применение методов математического программирования в задачах проектирования конструкций нефтеналивных судов, идеализируемых в виде статически неопределимых стержневых систем, получило развитие ещё в конце 60-х гг. прошлого века [16, 17]. S.Lund в 1971 г. представил в [16] результаты обстоятельного анализа результатов решения задачи оптимизации рамы супертанкера для различных вариантов компоновки поперечного сечения (количество распорок варьируется от нуля до двух, изменяется ширина грузовых танков). Задача поставлена следующим образом: в качестве ФЦ принята характеристика массы конструкции. Рама идеализирована в виде стержневой системы с подвижными узлами, учтена податливость продольных конструкций, участки в районе установки опорных книц представлены абсолютно жёсткими. Размеры сечения каждой из балок, входящих в состав рамы, выражены через безразмерные варьируемые параметры. Расчёт рамы ведётся в

матричной форме, для решения задачи нелинейного программирования использован алгоритм суммоводительной безусловной минимизации (метод SUMT).

В целом ряде отечественных работ 70-х-80-х гг. также рассмотрены вопросы оптимизационного проектирования конструкций судового корпуса, см., например [9,18,19,20].

Основные тренды современных зарубежных исследований в данной области – использование новых алгоритмов решения, в первую очередь, основанных на эвристических подходах, постановка мультикритериальных задач, использование современных численных методов механики в циклах решения. В отношении проектирования поперечных танкерных рам крупнотоннажных нефтеналивных судов следует особо выделить работы S.S. Na, D. Kaг и ряда корейских исследователей и инженеров [21,22,23,24]. Эти работы отражают все перечисленные выше тренды, при этом учитывая требования современных нормативных документов. Можно выделить ещё одно направление, получающее всё большее развитие – топологическая оптимизация конструкций судового корпуса. В работе [25] продемонстрирован весьма оригинальный подход, позволивший при выполнении основных требований Общих Правил, уменьшить массу конструкций танкерной рамы, в которой опорные кницы, фактически, заменены раскосами, топология которых получена в результате решения задачи.

Несмотря на достигнутый в мире в последние три десятилетия прогресс в разработке сложных исследовательских алгоритмов оптимизации конструкций судового корпуса, стоит отметить, что существует необходимость в создании более простых, ориентированных на использование в практике конструкторских бюро, эффективных программных средств автоматизированного параметрического проектирования, основанных на поисковых процедурах проектирования.

5. Верификация решений с использованием МКЭ

Формулы *prescriptive*-требований Правил для определения требуемых размеров балок, образующих раму, включают осреднённые значения коэффициентов перерезывающих сил и изгибающих моментов, полученные для типовых конструкций. Очевидно, что они не могут учесть всех эффектов, связанных с общей деформацией корпуса, поддерживающим влиянием продольных рамных связей, деформации сдвига, особенностями конструкции и т.д. Указанный недостаток устраняется в процессе выполнения проверочного расчёта, представляющего статический линейный анализ трёх-отсечной КЭ-модели под действием предписанных Правилами сценариев нагружения. Первые редакции Общих Правил для танкеров [26] допускали по результатам КЭ-анализа уменьшение моментов сопротивления и площадей сечений стенок балок до 15% относительно *prescriptive*-требований. В настоящее время такие указания из текста Правил исключены. В соответствии с Pt.2, Ch.2, Sec.3, 1.1.7 проектант имеет возможность в определённых случаях принять меньшую высоту стенки при выполнении прочих требований к характеристикам поперечного сечения, а также согласно Pt.2, Ch.2, Sec.3, 1.5.4 имеется возможность определения

требуемых характеристик сечения надпалубных рамных бимсов по результатам прямого численного анализа. Таким образом, на этапе анализа по МКЭ проектант имеет весьма ограниченную возможность для уменьшения размеров поперечного сечения балок, входящих в раму. В то же время, на этом этапе должна быть уточнена схема подкрепления стенок балок, геометрия опорных книц, вырезов, подробнее рассмотрен вопрос о границах участков с разными толщинами (т.е. раскрой деталей стенок и свободных поясков) и т.д. Разработка рекомендаций для таких уточнений (в том числе с использованием алгоритмов оптимизации) также может представлять интерес.

Заключение

В данной статье рассмотрены основные проблемы, связанные с проектированием поперечных танкерных рам современных нефтеналивных судов в соответствии с требованиями Правил. Основные выводы, которые можно сформулировать:

- требования Общих Правил МАКО имеют ряд серьезных методологических отличий от требований, привычных отечественным проектантам. Требования к поперечным танкерным рамам не являются исключением;

- на этапе верификации проектных решений по МКЭ основные размеры поперечных сечений балок в составе рамы должны быть известны и возможности

Информация о спонсорстве

Материалы, представленные в данной публикации, подготовлены в ходе выполнения НИР "Проблемы оптимизационно-поискового проектирования корпусных конструкций транспортных судов и надводных кораблей" (в рамках гранта СПбГМТУ для поддержки молодых ученых и специалистов, договор № НГ - 17/18 от 02.04.2018 г.).

Литература

1. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 01 Jan. 2019.
2. Тряскин В.Н. Методология параметрического проектирования конструкций корпуса судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск №2. С. 9-14.
3. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна: дис. ... докт. тех. наук. СПб., 2007. 339 с.
4. Алексакин Д.А., Бойко М.С., Кутейников М.А., Сотсков С.А. Процесс совершенствования требований Общих правил МАКО и выполнение Регистром проверочных расчетов при рассмотрении проектной документации // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск №2. С.59–63.
5. Horn G.E., Arima T., Baumans P., Вое А., Ocakli H. IACS Summary of the IMO GBS and the Harmonised Common Structural Rules // TSCF 2013 Shipbuilders Meeting, 2013. 24 с.
6. Shigemi, T., Zhu, T. Practical estimation methods of the design loads for primary structural members of tankers // Marine Structures. 16 (2003). С.275-321.
7. Бойко М.С., Кутейников М.А., Тряскин В.Н. Анализ требований гармонизированных Общих Правил МАКО и разработка специального программного обеспечения // Морской Вестник. 2014. 1(49). С.13-15
8. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975, 534 с.
9. Родионов А.А. Математические методы проектирования оптимальных конструкций судового корпуса. Л.: Судостроение, 1990, 248 с.
10. Родионов А.А. Использование коэффициентов чувствительности при проектировании конструкций судового корпуса // Судостроение, №1, 1997. С.12-16
11. Алексакин Д.А., Плотников К.В., Тряскин В.Н. Параметрическое проектирование поперечных гофрированных переборок навалочных судов с учётом требований Общих Правил МАКО // Морские интеллектуальные технологии. 2015. №4(30). Т.2. С.18-23
12. Karaboga D., Pham D. Intelligent Optimisation Techniques: Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks. Springer Verlag, London, 2000. 302 с.
13. Clerc M., Kennedy J. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. №6 (1). С. 58–73
14. Алексакин Д.А., Бойко М.С., Кутейников М.А. Применение метода «роя частиц» для автоматизированного параметрического проектирования поперечной танкерной рамы согласно требованиям Общих Правил МАКО // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. №48/49. С.51-58

15. Плотников К.В., Тряскин В.Н. Постановка и решение задачи проектирования поперечных танкерных рам в грузовой части крупнотоннажных нефтеналивных судов с использованием аппарата аппроксимации метода планирования эксперимента // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №3 (45). Т.2. С.93-100.
16. Lund S. Optimum design of transverse frame structures in tankers (в 2-х частях) // European Shipbuilding No.5 – 1971. С.3-9; No.6 – 1971. С.2-11
17. Мое J. Integrated design of tanker structures // European Shipbuilding Vol. 21, No. 3-4 – 1972. С. 49-59.
18. Карлин Л.В., Савинов Г.В., Савинова Г.В. К вопросу оптимального проектирования судовых перекрытий. // Труды ЛКИ, вып.120, 1977. С.46-49
19. Упырев В.М. Решение проектировочных задач СМК на базе оптимизации универсальных расчетных моделей: дис. ... канд. тех. наук. Л.: 1989.
20. Ипатовцев Ю.Н., Шулакова Л.Н. Оптимальное проектирование некоторых типов перекрытий танкеров// Материалы по обмену опытом НТО им. А.Н. Крылова, вып. 330 Численные методы расчета судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1980.С. 38-44.
21. Na S.S., Jang C.D. Development of an optimum structural design system for double hull VLCC // Transactions on the Built Environment Vol. 5. WIT Press,1994. С.163-175
22. Na S.S., Karr D. An efficient stiffness method for the optimum design of ship structures based on common structural rules // Ships and offshore structures. 2013. Vol.8, No.1. С.29-44
23. Shin S.H., Song H.C., Jang C.D. Optimum structural design of tankers using multi-objective optimization technique // Ships and offshore structures. 2006. Vol.1, No.3. С.213-219
24. Na S.S., Karr D. Development of Pareto strategy multi-objective function method for the optimum design of ship structures // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 8 (2016). С.602–614
25. Qiu W., Gao C., Sun L., Luo R. Research on topology optimization method for tanker structures in cargo tank region // TSCF 2016 Shipbuilders Meeting, 2016. 18 с.
26. Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, IACS, July 2008.

References

1. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 01 Jan. 2019
2. Tryaskin V.N. (2018) Metodologiya parametricheskogo proektirovaniya konstruksiy korpusa sudna [Methodology of parametric design of ship's hull structures]. Transactions of the Krylov State Research Centre, Special issue 2, pp. 9-14 (in Russian)
3. Tryaskin V.N. (2007) Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya konstruksiy korpusa sudna. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Methodology of computer-aided design of hull structures. Thesis for the degree of Doctor of Technical Science]. Saint-Petersburg, 339 p. (in Russian)
4. Aleksashin D.A., Boyko M.S., Kuteynikov M.A., Sotskov S.A. (2018) Protsess sovershenstvovaniya trebovaniy Obshchikh pravil MAKO i vypolnenie Registrom proverochnykh raschetov pri rassmotrenii proektnoy dokumentatsii [IACS Common Structural Rules development and RS design verification during ship plan approval]. Transactions of the Krylov State Research Centre, Special issue 2, pp. 59-63 (in Russian)
5. Horn G.E., Arima T., Baumans P., Bøe Å., Ocakli H. (2013) IACS Summary of the IMO GBS and the Harmonised Common Structural Rules. TSCF 2013 Shipbuilders Meeting. 24 p.
6. Shigemi, T., Zhu, T. Practical estimation methods of the design loads for primary structural members of tankers // Marine Structures. 16 (2003). С.275-321.
7. Boyko M.S., Kuteynikov M.A., Tryaskin V.N. (2014) Analiz trebovaniy garmonizirovannykh Obshchikh Pravil MAKO i razrabotka spetsial'nogo programmnoy obespecheniya [The review of IACS Common Structural Rules requirements and special software development] Morskoj Vestnik 1(49), pp.13-15 (in Russian)
8. Himmelblau D.M. (1972) Applied nonlinear programming, McGraw-Hill
9. Rodionov A.A. (1990) Matematicheskie metody proektirovaniya optimal'nykh konstruksiy sudovogo korpusa [Mathematical methods of ship structural optimization]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 248 p.
10. Rodionov A.A. (1997) Ispol'zovanie koeffitsientov chuvstvitel'nosti pri proektirovanii konstruksiy sudovogo korpusa [Application of sensitivity factors for ship structural design]. Sudostroenie 1 (1997), pp.12-16 (in Russian)
11. Aleksashin D.A., Plotnikov K.V., Tryaskin V.N. (2015) Parametricheskoe proektirovanie poperechnykh gofrirovannykh pereborok navalochnykh sudov s uchetom trebovaniy Obshchikh Pravil MAKO [Parametrical design of bulk carrier corrugated bulkheads according to the requirements of IACS Common Structural Rules] Marine Intellectual Technologies, 4(30), Vol.2, pp.18-23 (in Russian)
12. Karaboga D., Pham D. (2000) Intelligent Optimisation Techniques: Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks. Springer Verlag. 302 p.
13. Clerc M., Kennedy J. (2002) The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6 (1), pp. 58–73
14. Aleksashin D.A., Boyko M.S., Kuteynikov M.A. (2017) Primenenie metoda «roya chastits» dlya avtomatizirovannogo parametricheskogo proektirovaniya poperechnoy tankernoy ramy soglasno trebovaniyam Obshchikh Pravil MAKO [Application of particle swarm optimization algorithm for parametric design of oil tanker web frames according to IACS Common Structural Rules]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping 48/49, pp.51-58 (in Russian)
15. Plotnikov K.V., Tryaskin V.N. (2019) Postanovka i reshenie zadachi proektirovaniya poperechnykh tankernykh ram v gruzovoy chasti krupnotonnazhnykh neftenalivnykh sudov s ispol'zovaniem apparata approksimatsii metoda planirovaniya eksperimenta [Structural design of oil tankers transverse webs using design of experiments method] Marine Intellectual Technologies, 3(45), Vol.2, pp.93-100 (in Russian)

16. Lund S. (1971) Optimum design of transverse frame structures in tankers (in two parts). European Shipbuilding No.5 (1971), pp.3-9; No.6 (1971), pp.2-11
17. Moe J. (1972) Integrated design of tanker structures. European Shipbuilding Vol. 21, No. 3-4 (1972), pp. 49-59.
18. Karlin L.V., Savinov G.V., Savinova G.V. (1977) K voprosu optimal'nogo proektirovaniya sudovykh perekrytiy [On the issue of ship grillages optimum design]. Trudy LKI (Leningrad shipbuilding institute transactions), 120 (1977), pp.46-49
19. Upyrev V.M. (1989) Optimal'noe proektirovanie slozhnykh sudovykh konstruksiy: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Optimum design of complex ship structures: the PhD degree thesis]. Leningrad.
20. Ipatovtsev Yu.N., Shulakova L.N. (1980) Optimal'noe proektirovanie nekotorykh tipov perekrytiy tankerov [Optimum design of some oil tanker grillages]. Scientific exchange transactions of Krylov shipbuilding scientific society, 330 (1980). Leningrad, Sudostroenie, pp. 38-44.
21. Na S.S., Jang C.D. (1994) Development of an optimum structural design system for double hull VLCC. Transactions on the Built Environment Vol. 5. WIT Press, pp.163-175
22. Na S.S., Karr D. (2013) An efficient stiffness method for the optimum design of ship structures based on common structural rules. Ships and offshore structures Vol.8, No.1, pp.29-44
23. Shin S.H., Song H.C., Jang C.D. (2006) Optimum structural design of tankers using multi-objective optimization technique. Ships and offshore structures Vol.1, No.3, pp.213-219
24. Na S.S., Karr D. (2016) Development of Pareto strategy multi-objective function method for the optimum design of ship structures. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 8 (2016), pp.602–614
25. Qiu W., Gao C., Sun L., Luo R. Research on topology optimization method for tanker structures in cargo tank region. TSCF 2016 Shipbuilders Meeting, 2016. 18 p.
26. Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, IACS, July 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кирилл Вадимович Плотников, старший преподаватель кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: plotnikov@smtu.ru

Kirill V. Plotnikov, Dipl.-Eng., senior lecturer of ship structure and technical operation department, Saint Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation e-mail: plotnikov@smtu.ru

УДК 629.5.01
DOI 10.37220/МІТ.2020.48.2.025

Архитектурно-конструктивные особенности крупнотоннажных контейнерных судов

Юй Синьянь¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Проектирование крупнотоннажных контейнеровозов и конструкций корпуса таких судов, в частности – сложные технические задачи. Для их успешного решения необходимо располагать достаточным опытом и иметь в наличии данные по существующим судам-прототипам. Публикации по этим вопросам, особенно в России, судостроительная отрасль которой не специализируется на проектировании таких судов, достаточно ограничены и касаются в основном проблем проектирования контейнеровозов с относительно небольшой контейнерной вместимостью. В настоящее время крупнейшие контейнеровозы, которые поставляются уже с 2013 года, достигают вместимости 13800 – 22000 TEU. Эти суда – большой шаг к значительному росту размеров контейнеровозов, происходящему в течение последних лет.

Цель настоящей статьи – представить некоторые результаты обобщения современной информации об архитектурно-конструктивных особенностях крупнотоннажных контейнеровозов с контейнерной вместимостью от 10 до 20 тыс. TEU, которая необходима для решения задач параметрического проектирования / выполнения проверочных расчетов прочности конструкций корпуса таких судов. В статье представлены данные о тенденциях в строительстве и заказе контейнеровозов различных размеров по всему миру с 1960 по 2020 г. Приведены статистические зависимости, связывающие водоизмещение, дедвейт, количество перевозимых контейнеров, а также соотношения главных размерений с длиной крупнотоннажных контейнерных судов в диапазоне вместимости 8800-22000 TEU. Рассмотрены архитектурно-конструктивные особенности крупнотоннажных контейнерных судов в части: компоновки грузового района, размеров и формы грузовых трюмов. Отмечены особенности конструкции корпуса контейнеровоза и факторы их обуславливающие. Указано определяющее влияние размеров контейнеров на формирование геометрии и конструкции корпуса. Выделены главные проблемы, которые приходится решать при проектировании конструкций корпуса крупнотоннажных контейнеровозов

Ключевые слова: архитектурно-конструктивные характеристики, контейнеровместимость, крупнотоннажные контейнеровозы, общее кручение корпуса, задачи параметрического проектирования корпусных конструкций контейнерных судов, статистические данные, суда с широким раскрытием палубы

Architectural and structural peculiarities of large tonnage container vessels

Xinyan Yu¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract The design of large-capacity container ships and the hull structures of such ships, in particular, are complex technical tasks. For their successful solution, it is necessary to have sufficient experience and to have available data on existing prototype vessels. Publications on these issues, especially in Russia, the shipbuilding industry of which does not specialize in the design of such vessels, are quite limited and deal mainly with the problems of designing container ships with a relatively small container capacity. Currently, the largest container ships that have been supplied since 2013 reach a capacity of 13,800 - 22,000 TEU. These vessels are a big step towards a significant increase in the size of container ships over the past few years.

The purpose of this article is to present some results of summarizing modern information on the architectural and structural features of large-capacity container ships with a container capacity of 10 to 20 thousand TEU, which is necessary for solving the problems of parametric design / performing verification of the hull's structural strength of such vessels. The article presents data on trends in the construction and ordering of container ships of various sizes around the world from 1960 to 2020. Statistical dependencies that link the displacement, deadweight, the number of containers transported, as well as the ratio of the main dimensions with the length of large-tonnage container vessels in the range of capacity 8800- 22,000 TEU are presented. The architectural and structural features of large-tonnage container ships in application to the layout of the cargo area, the size and shape of cargo holds are considered. The design features of the container ship's hull and their contributing factors are noted. The determining influence of container sizes on the formation of the geometry and structure of the ship's hull is indicated. The main problems that have to be addressed when designing the hull structures of large-tonnage container ships are identified.

Key words: architectural and structural characteristics, container ship capacity, global torsion of ship's hull, large-capacity container ships, statistical data, tasks of parametric design of hull structures of container ships, TEU

Введение

Морские контейнерные перевозки – это звено контейнерной транспортно-технологической системы, обеспечивающей перевозку грузов по линиям железных дорог, разделенных водным пространством.

Контейнеровозы – узкоспециализированные транспортные суда, предназначенные для перевозки строго определенного вида груза – груза в контейнерах (рис.1). Контейнеровозы проектируются на определенную линию. Появление контейнеровозов продиктовано стремлением увеличить скорость проведения грузовых операций и эффективность судна как элемента транспортной системы. Если скорость погрузо-разгрузочных работ на универсальных сухогрузных судах составляет 50-70 т/час, то у контейнеровозов этот показатель возрастает практически в 10 раз (300 – 600 т /час).

Почти 90% всех не навалочных грузов перевозится в контейнерах. Без сомнения контейнеровозы являются двигателем так называемой "глобализации". Это означает, что все в мире производится там, где выгодно, и перевозится по всему миру, туда, где востребовано. Из-за

"контейнеризации" транспортные расходы стали несущественными по сравнению с затратами на производство потребительских товаров.



Рис. 1. Перевозка груза в контейнерах на контейнеровозе китайской судоходной компании

Размеры контейнеровоза измеряются в специальных единицах - TEU (Twenty foot Equivalent Unit), определяющих их «контейнерместимость» (container intake) или просто «местимость» (intake). На рис. 2 показано развитие и распределение мирового флота контейнеровозов в зависимости от контейнерместимости [1].

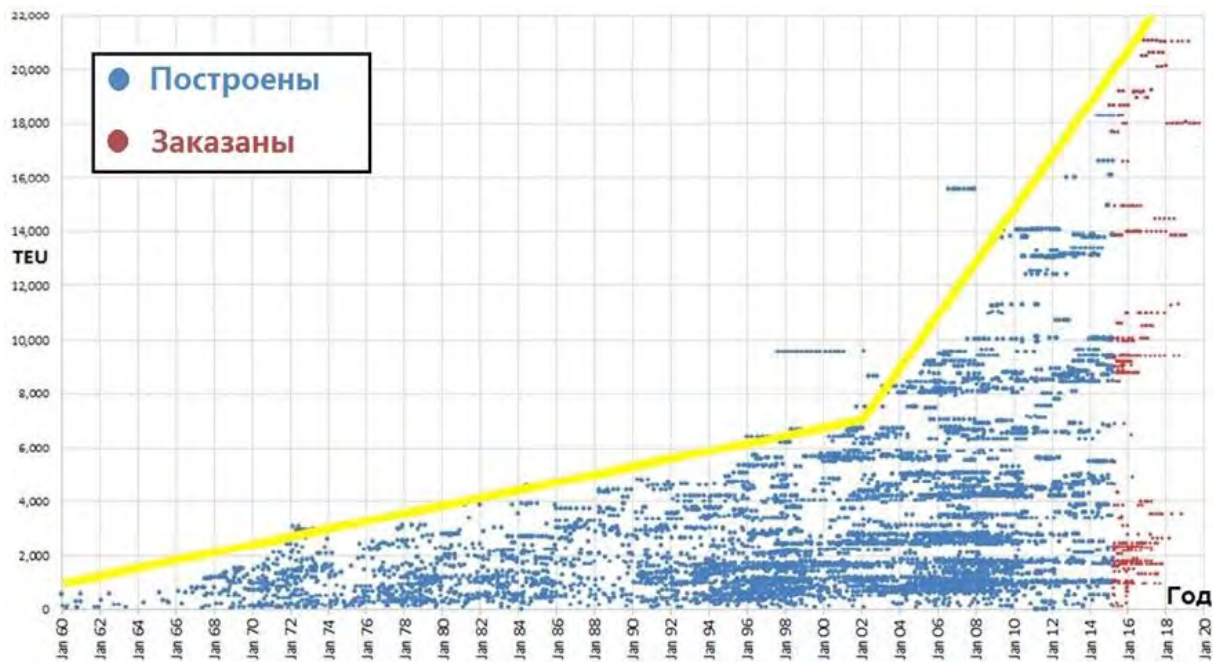


Рис. 2. Статистический график строительства и заказа контейнеровозов различных размеров по всему миру с 1960 по 2020 г

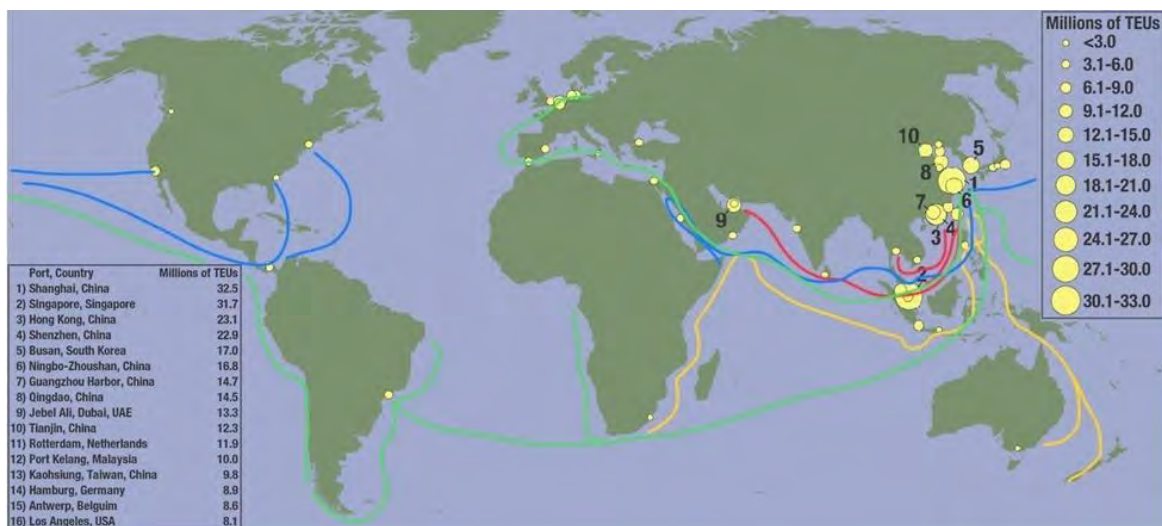


Рис. 3. Линии контейнерных перевозок из КНР и двадцать самых загруженных портов мир

В настоящее время крупнейшие контейнеровозы, которые поставляются уже с 2013 года, достигают вместимости 13800 – 22000 TEU. Эти суда - большой шаг к значительному росту размеров контейнеровозов, происходящему в течение последних лет.

Китайская Народная Республика (КНР) имеет очень развитую сеть торговых путей, которые обслуживаются контейнерными судами. Линии контейнерных перевозок из КНР и двадцать самых загруженных портов мира представлены на рисунке 3 [2].

Проектирование крупнотоннажных контейнеровозов и проектирование корпусных конструкций, в частности, – сложные технические задачи. Для их успешного решения необходимо располагать достаточным опытом и иметь в наличии данные по существующим судам-прототипам. Обстоятельные рекомендации по проектированию контейнеровозов вместимостью до 3000 TEU (по состоянию на конец 80-х годов XX века) даны в работе [3]. Цель настоящей статьи – представить некоторые результаты обобщения современной информации об архитектурно-конструктивных особенностях крупнотоннажных контейнеровозов с контейнерной вместимостью от 10 до 20 тыс. TEU, которые позволят решать задачи параметрического проектирования конструкций корпуса таких судов в рамках методологии, обоснованной в работах специалистов кафедры конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ [4]. Пример использования такой информации применительно к формированию исходных данных для проектирования элементов конструкций корпуса крупнотоннажного контейнеровоза по требованиям к местной прочности представлен в статье [5].

1. Размеры специализированных контейнеровозов

Контейнеровозы делятся на линейные «main liners» и фидерные «feeder vessels». Главное различие заключается в том, что линейный контейнеровоз представляет собой судно, перевозящее грузы в контейнерах между

континентами в большие контейнерные порты, так называемые «main hubs» – главные распределительные пункты. Тогда как фидерный контейнеровоз – это судно для перевозки контейнеров на относительно небольшое расстояние – из главных узловых портов в другие порты, расположенные вблизи него.

Линейные контейнеровозы, как правило, имеют большие размеры. Долгое время их размерения определялись максимальной шириной шлюзов Панамского канала, что привело к появлению так называемых «Panamax» – контейнеровозов с контейнерной вместимостью 4250-4500 TEU с максимальной шириной 32,25 м.

Около 25 лет назад были построены так называемые «Post-Panamax» – контейнеровозы в связи с тем, что новые шлюзы Панамского канала позволяют пропускать суда больших размеров вместимостью до 13000 TEU и шириной до 48,2 м.

Дедвейт современных контейнерных судов достигает 200 тыс.т., а коэффициент утилизации водоизмещения по дедвейту $\eta_{DW} = DW / \Delta$ может превосходить $\eta_{DW} = 0.75$. Такое высокое значение этого коэффициента достигается за счет размещения на верхней палубе большого количества контейнеров. Так у современных крупнотоннажных линейных контейнеровозов на верхней палубе размещается до 10 ярусов контейнеров. На рисунке 4 примерно в одном масштабе показан общий вид реальных судов в диапазоне контейнеровместимости от 200 до 22000 TEU. На рис. 5 представлены зависимости водоизмещения Δ , дедвейта DW и количества перевозимых контейнеров K_{TEU} от длины между перпендикулярами, L_{BP} контейнерного судна.

В настоящее время длина между перпендикулярами контейнерных судов достигает $L_{BP} = 383$ м, ширина – $B = 58,6$ м, высота борта – $H = 30,5$ м, расчетная осадка $T_{sc} = 16$ м (судно с контейнерной вместимостью 20 тыс. TEU).

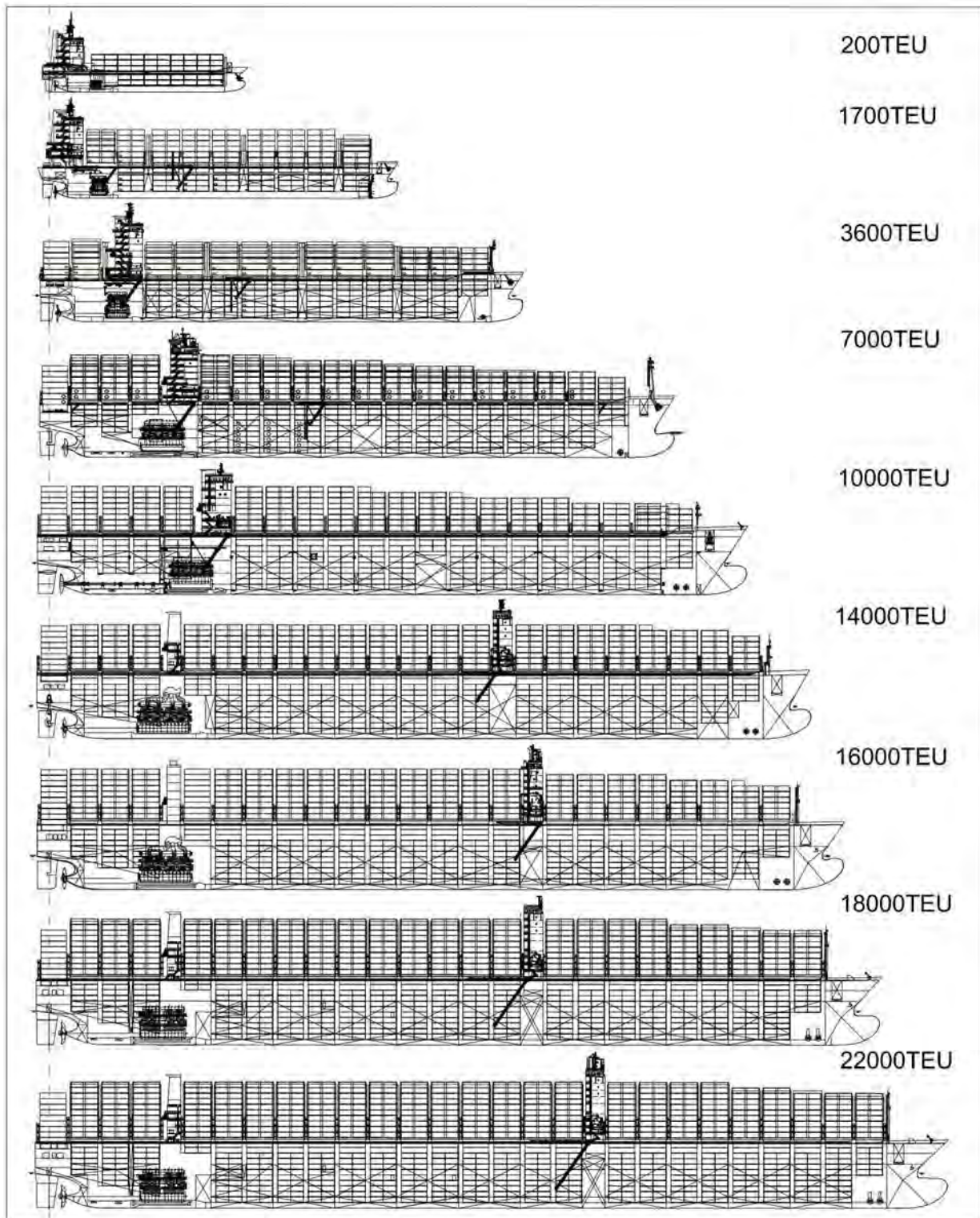


Рис. 4 Общий вид реальных судов - контейнеровозов

Соотношения главных размерений (средние значения) составляют: $B / L_{BP} = 0,152$
 $H / L_{BP} = 0,083$
 (максимальная погрешность $\pm 10\%$),
 (максимальная погрешность $\pm 5\%$). Среднее значение отношения расчетной осадки судна к длине между перпендикулярами составляет $T_{sc} / L_{BP} = 0,045$; при этом наблюдается слабое уменьшение значения

этого параметра при увеличении длины судна в соответствии с зависимостью:

$$T_{sc} / L_{BP} = 0.2297 - 0.0316 \ln(L_{BP})$$

Оценки соответствуют диапазону контейнерной вместимости $k_{TEU} = 8800 - 20000$ TEU.

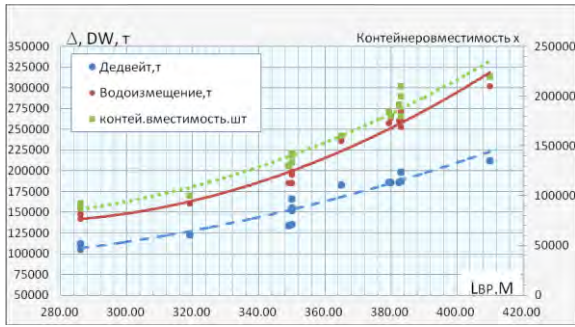


Рис. 5 Зависимости водоизмещения Δ , дедвейта DW и количества перевозимых контейнеров K_{TEU} от длины контейнерного судна L_{BP} в диапазоне вместимости 8800-22000 TEU

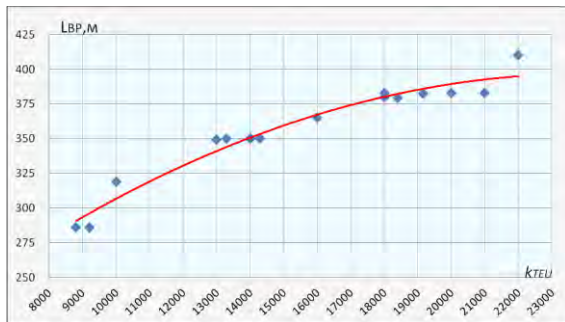


Рис. 6. Зависимость длины судна между перпендикулярами L_{BP} от контейнеровместимости, K_{TEU} контейнеровоза

2. Размеры и форма грузовых трюмов

Размеры грузовых трюмов контейнерных судов полностью регламентируются размерами контейнеров. Все контейнерные суда имеют грузовые трюмы «ящичной» формы, в соответствии с распределением контейнеров внутри корпуса судна. Специфическую форму имеют трюмы в кормовой и носовой части грузового района, которые часто называют обезьяньи скалы (“monkey-rocks”) по аналогии организации мест обитания обезьян в зоопарке. Размеры уступов в таких грузовых трюмах согласуются с размерами контейнеров (см. рис. 7).

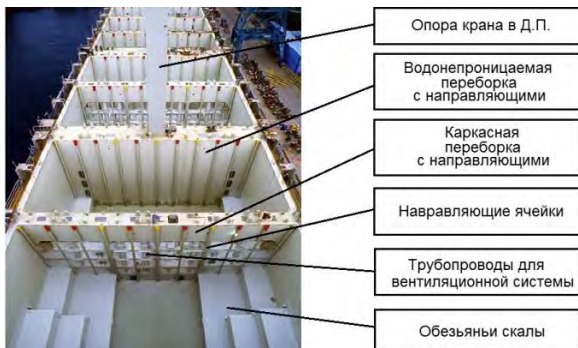


Рис. 7 Форма грузовых трюмов контейнеровоза

С учетом требований конвенции МАРПОЛ между некоторыми грузовыми трюмами устанавливаются дополнительные поперечные водонепроницаемые переборки, предназначенные для выделения

топливных диптанков. Диптанки отделяются от наружной обшивки балластными или пустыми отсеками двойных бортов.

Двойные борта. Почти все контейнеровозы имеют двойное дно и двойной борт обычно на всей длине грузового района. Это обусловлено не только необходимостью размещения жидкого балласта, но и требованиями по обеспечению общей прочности корпуса при сдвиге и кручении. Ширина двойного борта приблизительно согласуется либо с половиной ширины контейнера (1300 мм) либо с полной его ширине (2600 мм). Первое конструктивное решение является более распространенным у фидерных судов, но также используется в некоторых проектах линейных контейнеровозов, что приводит к серьезным проблемам при обеспечении общей прочности корпуса судна в связи с предельно большими раскрытием верхней палубы.

Размеры контейнеров. Размеры контейнеров в основном регламентируются международным стандартом ISO 688. Данным стандартом предоставляется достаточно большой выбор размеров контейнеров, тогда как в трансконтинентальном морском транспорте используются лишь некоторые из них. Длина контейнеров, используемых в межконтинентальных перевозках, в основном либо 20' (6058 мм - TEU) или 40' (12192 мм - FEU). Ширина ISO-контейнеров 8' (2438мм), такая же, как и высота контейнеров двух наиболее широко используемых размеров (20' и 40'). Кроме этого, широко используются контейнеры с нормальной высотой 8'6" (2591мм), и так называемые высокие контейнеры ("High Cube") с высотой 9'6" (2895мм). Другие высоты контейнеров согласно стандарту ISO 688 могут быть применены, но широко не используются.

Сотовые системы. Для фиксации контейнеров в грузовом трюме применяются сотовые системы (Cell Guide System), образуемые направляющими и устройствами крепления фитингами. Фитинги применяются в основном из-за необходимости укладки 20-ти футовых контейнеров (20') в 40-ка футовой (40') сотовой системе. Различные технические решения существуют для решения этой проблемы. Так, иногда используются передвижные сотовые направляющие для перевозки в одном трюме контейнеров различной длины (например, 45' или 40'). Сотовые системы используются частично на палубах и, например, выше помещений машинного отделения, впереди надстройки.

Масса контейнера. Помимо размеров контейнеров, их масса также существенно влияет на проектирование конструкций. Максимальная масса одного контейнера сегодня достигает 30480кг. Сами контейнеры проектируются из расчета максимального стека (штабеля) из 5 или 7 полностью загруженных контейнеров (при средней массе одного стека 150 или 210 т). Важно понимать, что сила тяжести стека передается на конструкции корпуса судна через четыре нижних угловых фитинга контейнера. Нагрузка от стека (штабеля) должна быть определена на ранней стадии разработки проекта, поскольку она имеет большое значение для проектирования конструкций корпуса судна. Обычно нагрузка на палубу грузового отсека/крышу цистерны – определяется числом контейнеров с максимальной массой. Для крышек люков нагрузка от стека массой

60-90 т является наиболее распространенной. Более высокие значения часто не реальны в связи с проблемами обеспечения прочности системы крепления контейнера. Однако более высокие значения могут быть достигнуты с помощью, так называемых, опорных мостов «lashing bridges» (верхних частей каркасных переборок – S.P.B.), устанавливаемых в грузовых трюмах (обычно не более одного на длине грузового трюма) (рис. 8).

Люковые крышки. Люки на главной палубе закрываются понтонными или гидравлическими складными крышками. Ширина крышки люков согласуется с шириной трюма. Понтонные крышки устанавливаются или снимаются с помощью собственных или береговых кранов. Длина крышки люка понтонного типа, как правило, соответствует длине 40' контейнера (12.2 м). Так как грузоподъемность кранов связана с максимальной массой контейнеров, одна панель крышки понтонного типа не должны быть тяжелее, чем 30 т. В связи с этим ограничением понтонные люковые закрытия на больших контейнерных судах делятся на несколько секций в продольном направлении.

3. Особенности конструкции корпуса контейнеровоза

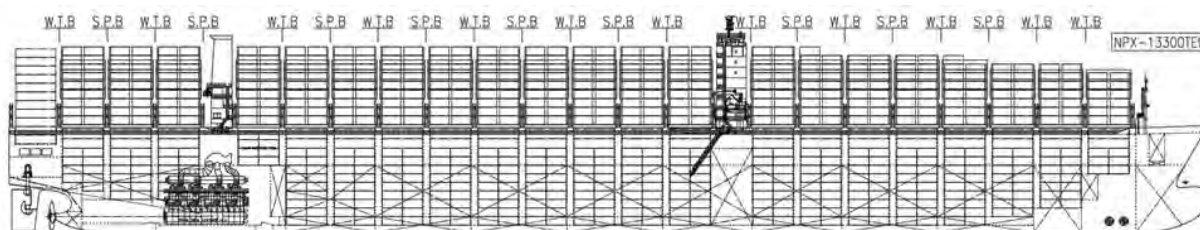


Рис. 8. Общее расположение New Panamax-контейнеровоза вместимостью 13300TEU

Проблемы обеспечения общей продольной прочности. Большое раскрытие палубы приводит к применению больших толщин палубного стрингера (до 35 – 100 мм) с целью обеспечения общей прочности корпуса. В качестве конструктивного решения для уменьшения толщины палубного стрингера рекомендуется применение сталей повышенной прочности и продольной системы набора верхней палубы. Практически в настоящее время на крупнотоннажных контейнеровозах для этих конструкций применяется сталь с пределом текучести до 420 МПа. Применение продольной системы набора позволяет более 48.9% площади пояса эквивалентного бруса формировать за счет материала продольных балок. Для их изготовления используется толстый полосовой профиль с толщиной до 80 мм.

Специальные конструктивные решения применяются для конструктивного оформления вырезов в районе углов грузовых люков для снижения концентрации напряжений в углах люка: Наиболее эффективно снижается уровень концентрации напряжений в случае скругления выреза в палубе с большим радиусом или по дуге эллипса, вытянутого в продольном направлении.

Но такое решение приведет к существенной потере полезной вместимости грузового трюма (см.рис.10).

Большое раскрытие палубы, достигающее 78%-91% ширины судна, приводит к ряду серьезных проблем при обеспечении жесткости и прочности корпуса судна:

Проблемы с обеспечением жесткости корпуса судна на кручение. Общепринятое архитектурно-конструктивное решение этой проблемы – применение двойных бортов или, по крайней мере, подпалубных цистерн (рис.9). В некоторой степени можно достигнуть повышения жесткости корпуса на кручение за счет промежуточного расположения МКО.

Трудности с обеспечением поперечной прочности корпуса судна. Участки верхней палубы небольшой ширины не могут рассматриваться как жесткие опоры для бортовых конструкций. Решение проблемы – более частая расстановка поперечных водонепроницаемых переборок или установка между водонепроницаемыми переборками пронизаемых (каркасных) переборок, которые в этом случае также являются эффективными опорами для бортовых конструкций (приблизительно через 12-13 м, см.рис.8).

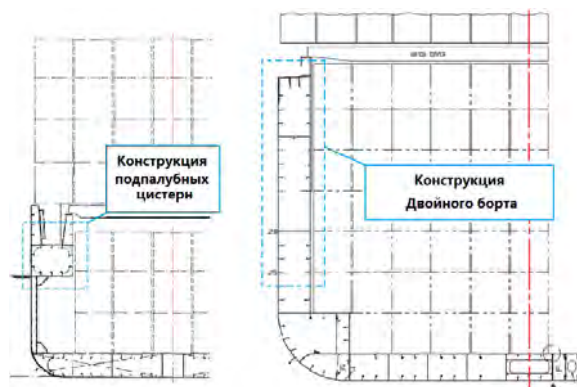


Рис.9. Два вида бортовой конструкции контейнеровоза

Существуют различные конструктивные решения для улучшения ситуации. Например, фирмой Bremer Vulkan, Germany предложено для снижения концентрации напряжений скругленный вырез делать не в настиле верхней палубы, а на уровне верхних поясков поперечного и продольного комингсов (рис. 11).

Другое решение - применение специальных формы вырезов в районе углов люков с целью обеспечения наиболее эффективного размещения контейнеров в грузовых трюмах (рис. 12).

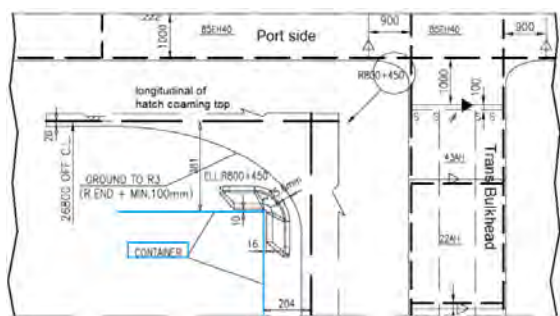


Рис. 10 Конструкция выреза в палубе грузового отсека с большим эллиптическим радиусом

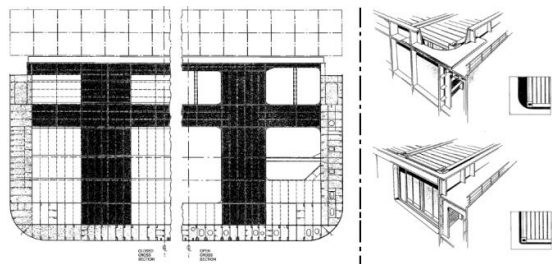


Рис. 11 Возможное решение для снижения потери вместимости грузовых трюмов

Особенности выбора стали для корпусных конструкций. Для корпуса контейнеровоза характерно низкое положение нейтральной оси. В связи с этим обычно удается применить обычную углеродистую сталь нормальной прочности для листовых конструкций и продольных балок дна и второго дна. Однако это может быть не целесообразным решением для участков второго дна и флоров в районе опорных сечений, где, в связи с проблемами при обеспечении поперечной прочности, возникают большие напряжения при изгибе сплошных флоров и вертикальных диафрагм двойного борта под действием поперечных нагрузок.

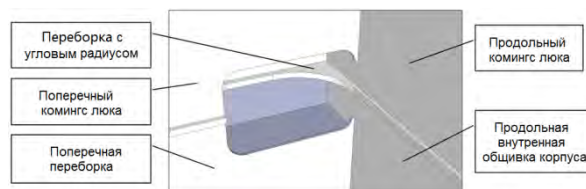


Рис. 12 Специальная форма вырезов в районе углов люков.

Особенности конструктивной компоновки дна и двойного борта. На современных контейнеровозах конструкция дна и двойного борта (система набора, шпация, расстояние между рамными балками и т.п.) полностью подчинена размерам контейнеров, что обеспечивает оптимальное расположение опор под контейнеры:

Конструктивная компоновка дна (шпация продольного набора, расположение стрингеров, положение сплошных флоров) часто согласуются с расстоянием между фитингами стандартных контейнеров;

Размеры контейнеров влияют на выбор шпации продольного набора, а также на положение вертикальных и горизонтальных диафрагм наружного и внутреннего борта;

Высокие местные статические и динамические нагрузки на конструкции второго дна в районе крепления фитингов (до 2100 КПа) приводят к необходимости введения местных усилений под углами контейнеров: дополнительные стрингеры и поперечные brackets (рис. 13).

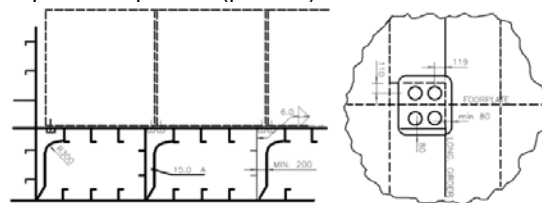


Рис. 13 Дополнительные стрингеры и поперечные brackets под углами контейнеров

Литература

1. DNV-GL Container Ship Fleet Report 2018-2019, analytical report, DnV-GL Shanghai Branch 2018
2. Фу Чжан. Китайские морские перевозки. Технический журнал. Текущая ситуация и тенденции развития рынка контейнерных перевозок.
3. Гайкович А.И. Проектирование контейнерных судов. Часть I. Учебное пособие. Издание ЛКИ, Ленинград, 1985, 92 с.
4. Тряскин В.Н. Методология параметрического проектирования конструкций корпуса судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск № 2. С. 9-14.
5. Тряскин В.Н., Юй Синьянь. Методика оценки характеристик поперечного сечения корпуса крупнотоннажного контейнеровоза на ранних стадиях проектирования судовых корпусных конструкций. Морские Интеллектуальные технологии. № 3 (45) т.2 2019, с. 87-92.

References

1. DnV-GL Container Ship Fleet Report 2018-2019, analytical report, DnV-GL Shanghai Branch 2018
2. Fu Zhang. Chinese shipping. Technical journal. Current situation and trends in the development of the container shipping market.
3. Gaykovich A.I. Proektirovanie konteynemykh sudov. Chast I. Uchebnoe posobie. [Container ship design. Part 1. Tutorial]. Edition Leningrad Shipbuilding Institute, Leningrad, 1985, 92 pages.
4. Tryaskin V.N. Metodologiya parametricheskogo proektirovaniya konstruktsiy korpUSA sudna. [Methodology of parametric designing of ship's hull structures]. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 9-14 (in Russian).

5. Tryaskin V.N., Yu Xinyan. Metodika otsenki kharakteristik poperechnogo secheniya korpusa krupnotonnazhnogo konteynerovoza na rannikh stadiyakh proektirovaniya sudovykh korpusnykh konstruksiy. [Methodology of hull girder cross-sectional characteristics estimation on the preliminary stage of large containerships structural design]. Marine Intellectual Technologies. № 3 (45) т.2 2019, с. 87-92.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юй Синьянь, аспирант кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru

Xinyan Yu, M.Eng., post-graduate student of ship structure and technical operation department, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru

УДК 629.12.001.2:681.518
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.026

Модель инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники

А.В. Алексеев¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Лавинообразный рост сложности современных объектов морской техники, морских интегрированных автоматизированных систем в защищенном исполнении, ужесточение требований к качеству процессов их создания и эксплуатации на всех этапах жизненного цикла обуславливают острую необходимость поиска инвариантных решений по их модельному представлению, а также технологии анализа, синтеза, оптимизации проектных решений. Более того, по количественному обоснованию конкурентной способности, путей их технологического развития. В результате проведения ряда поисковых и прикладных исследований обоснована целесообразность и возможность инвариантного модельного представления качества современных структурно сложных систем, а также мониторинга, прогнозирования и управления их качеством. 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: исследовательское проектирование, сложность, интегрированные системы управления, квалиметрия управления, инвариантность, полимодельность, мониторинг.

Model for invariant assessment of quality and efficiency for research design of marine engineering facilities

Anatoly V. Alekseev¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The avalanche-like increase in the complexity of modern marine engineering objects, marine integrated automated systems in protected execution, and stricter requirements for the quality of their creation and operation processes at all stages of the life cycle make it necessary to search for invariant solutions for their model representation, as well as technologies for analysis, synthesis, and optimization of design solutions. Moreover, the quantitative justification of competitive ability and ways of their technological development. As a result of a number of search and applied research, the feasibility and possibility of invariant model representation of the quality of modern structurally complex systems, as well as monitoring, forecasting and quality management are proved. 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: research design, complexity, integrated control systems, control qualimetry, invariance, polymodel, monitoring.

Введение

Систематизация данных модельного представления сложных организационно-технических систем, к числу которых в полной мере относятся современные корабельные и судовые электроэнергетические системы (СЭС), автоматизированные системы в защищенном исполнении (АСЗИ), системы управления оружием и техническими средствами (СУ ОТС) и многие другие объекты морской техники (ОМТ) и инфраструктуры (ОМТИ), представляет собой весьма сложную исследовательскую задачу [1-4].

Современные ОМТ типа атомные суда, нефтеналивные суда, в том числе ледового класса танкеры, газовозы, химовозы и т.п., морские ледостойкие стационарные платформы типа «Приразломная» и другие характеризуются целым рядом качественно новых свойств, определяемых спецификой внедряемых сегодня технологий, уровнем их реализации и развития.

При **анализе технологических путей** развития современных структурно сложных систем в составе ОМТИ, и, особенно, систем ситуационного управления, приходится учитывать большое число

групповых показателей качества (ГПК), отражающих свойства ОМТИ. Каждый из них рассчитывается с использованием также большого числа измеряемых, либо оцениваемых экспертами частных показателей качества (ЧПК). Без **количественной их оценки** практически не представляется возможным принимать обоснованные решения по определению системных и технологических **путей развития**.

Более того, особо востребованными сегодня следует считать модели и соответствующие **базы данных и знаний** (БДЗ), **инвариантные к специфике ОМТИ**, т.е. имеющие обобщенный, а в ряде случаев - типовой характер, а технологии реализации моделей – не зависящие от их специфических (позитивных и негативных) свойств.

К числу таких методологических возможностей и средств их программной реализации в силу своего системного характера, по нашему мнению, в полной мере относится **методический аппарат и средства квалиметрического оценивания, синтеза и оптимизации** сложных эргатических (человеко-машинных) систем на основе соответствующих методов измерения, оценивания и управления их качеством [5-6].

1. Моделирование качества объектов морской техники и морской инфраструктуры

Лавинообразное возрастание структурной и алгоритмической сложности современных ОМТИ, включая морские интегрированные системы управления в защищенном исполнении (МИСУВЗИ), стало следствием интенсивного развития современных информационных технологий, ужесточения требований к качеству процессов создания и эксплуатации ОМТИ, причем, на всех стадиях их жизненного цикла (ЖЦ) [7-8].

Это обуславливает **актуальность** и **цель исследований - поиск инвариантных решений модельного представления ОМТ**, как **объекта исследовательского проектирования** (ОИП) [1], соответствующего анализа, синтеза и оптимизации качества, конкурентной способности системных и технических решений, перспективности их развития.

Более того, в условиях резкого возрастания **проблемы сложности современных ОМТИ** без моделирования их качества, по нашему мнению, **не представляется возможным** [9-10] обоснование к ним требований, формирование их облика, поиск технологических путей развития и проектирование (концептуальное, исследовательское, техническое, технологическое) конкурентно способных средств и систем, а также их эффективная эксплуатация.

Качество, как мера соответствия ОИП своему предназначению, действительно **является базовым системным свойством и критерием**, характеризующим совокупность его основных свойств и характеристик. Поэтому одной из первых и наиболее важных задач квалиметрического оценивания следует считать корректное построение **системно целостного множества критериев ОИП** с соответствующими ЧПК q_n при их общем числе N , агрегируемых в соответствующие G ГПК.

Каждый из ГПК тем самым характеризует определенное свойство ОМТИ, а их векторное сложение позволяет выйти соответственно на модельный (МПК) и комплексный (агрегированный, обобщенный, интегральный) показатель качества (КПК) соответствующего ОИП, в т.ч. типа ОМТИ.

Для иллюстрации сказанного и несколько упреждая изложение материала на рис. 1 приведен результат подобных оценок применительно к структурно сложному ОМТ класса «Ледокол».

Получение подобных оценок позволяет на принципиально новом уровне решать задачи концептуального, исследовательского (ИП) и конструкторского-технологического обоснования эффективных и оптимальных проектных и эксплуатационных решений за счет специфики инвариантного моделирования объектов.

Причем, переход от ЧПК к агрегированным показателям качества (АПК) типа ГПК, МПК, комплексного показателя качества реализует так называемый полимодельный (многомодельный) подход к оценке качества каждого ОИП отдельно. А для их системы (группы) – от агрегированного системного показателя качества (АСПК) с соответствующей моделью индексов значимости каждого элемента в составе системы ОИП к модельному (МСПК) и полимодельному системному показателю качества (ПСПК).

Как следствие, именно КПК и ПСПК позволяют количественно оценивать и анализировать основные свойства ОИП (ОМТИ) и их групп, синтезировать предпочтительные свойства, обосновывать оптимальные варианты построения, создания, использования, применения ОИП на всех стадиях жизненного цикла.

Оценка конкурентной способности (КС) и перспективности развития (ПР) объекта морской техники класса "Ледокол"						
Назначение объекта морской техники (ОМТ): Проводка судов в замерзших бассейнах						
Основные конкурентные свойства ОМТ класса "Ледокол" (варианта "5.МАЛ «Ямал»" по отношению к варианту "4.МАЛ «Вайгач»"):						
1. Продукционное качество (Энергоэффективность, Водоизмещение, Количество видов продукции) 2. Технологичность обслуживания (Плотность эксплуатации, Ремонтопригодность, ресурсоёмкость обслуживания) 3. Конструктивное качество (ресурсная экономичность, Безопасность эксплуатации, эргономичность, дизайн и др.) 4. Экономичность владения (закупочная стоимость, расходных материалов, стоимость обслуживания)						113,36% 102,87% 108,08% 93,45% 106,9%
Оценка конкурентной способности ОМТ варианта 5 к 4						
Критерии оценки качества \ Объект морской техники (ОМТ)	ПКЗ (вес)	1.ГЭЛ "Нилья Муромец", пр. 21180	2.А.Л "Арктика", пр. 22220, СПб	3.А.Л "Россия", 1983	4.МА.Л «Вайгач», пр. 19580 (1999, Флотация)	5.МА.Л «Ямал», 1992
ГПК: 1. Энергоэффективность, %	80	48,2%	132,5%	122,9%	100,4%	121,2%
ЧПК:	40	10,2	60,0	52,8	36,0	52,8
1.1. Мощность на валу, МВт	10	1600	1700	1600	1500	1200
1.2. Мощность СЭС, кВт	10	15,0	20,8	13,1	18,5	21,0
1.3. Скорость судна, узл.	20	1,0	2,0	2,0	1,77	2,0
1.4. Ледопробитость, м	20	2,00	6,00	7,00	6,00	6,00
1.5. Автономность плавания, мес	25	3 100	23 000	23 625	21 100	23 460
2. Водоизмещение, т	15	4	2	2	3	3
3. Количество видов продукции, ус.ед.	40	83,4%	90,6%	94,4%	100,0%	103,9%
4. Экономичность ЭЭС, %	15	131	145	142	139	135
4.1. Мин. удельный расход топлива, г/(д.с.*ч)	15	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
4.2. Мин. удельный расход масла, г/(д.с.*ч)	70	30	35	37	40	42
4.3. КПД, %	90	96,5%	105,2%	100,0%	100,0%	110,7%
5. Ресурсная экономичность, %	30	30	180	140	120	220
5.1. Автономность судна по снабжению, сут.	30	32	150	118	89	107
5.2. Экипаж, чел.	40	500	3800	3850	3581	2750
5.3. Грузовместимость, т	80	58,4%	82,3%	89,4%	100,0%	113,4%
6. Экологичность судна, %	80	1,5	1,0	0,9	0,8	0,7
6.1. Токсичность, г/кВч	20	70	60	60	55	50
6.2. Шумность, дБ	88	123,3%	85,5%	85,8%	100,0%	102,9%
7. Технологичность обслуживания, %	50	50	90	85	80	81
7.1. Сложность эксплуатации, ус.ед.	30	50	55	50	48	54
7.2. Ремонтопригодность, ус.ед.	20	25	45	40	15	15,2
7.3. Ресурсоёмкость обслуживания, тыс.руб.	80	103,5%	94,0%	100,0%	100,0%	106,0%
8. Безопасность эксплуатации, %	40	80	75	80	80	85
8.1. Безрисковость эксплуатации судна, у.е.	60	90	80	85	85	90
8.2. Локализуемость аварийных ситуаций, у.е.	90	302,8%	105,2%	113,0%	100,0%	93,4%
9. Экономичность владения, %	60	300	700	650	850	900
9.1. Закупочная стоимость, млн.руб.	25	12	55	50	40	45
9.2. Расходные материалы на 1т.км, тыс.руб.	15	1,0	3,5	3,4	3,3	3,4
9.3. Стоимость обслуживания, млн.руб.	10	90	80	80	90	91
10. Эргономичность, дизайн, другие ГПК, ед	КСа	1,196	1,000	1,012	1,001	1,070
Конкурентная способность вариантов ОМТ (КСг), ед	КСг	1,071	0,994	1,007	1,001	1,069
	КСм	0,958	0,987	1,003	1,001	1,067
	Рке-г	1	5	3	4	2
Перспективность развития (ПР) относительно вар. 2, %		1,7%	0,0%	1,4%	0,7%	7,5%

Рис. 1 – Пример вариантного сравнения качества и свойств ОМТ класса «Ледокол»

Соответственно, именно ПСПК позволяет количественно оценивать и анализировать основные свойства системы ОМТИ, как объекта исследовательского системного проектирования (ОИСП), синтезировать предпочтительные ее свойства, обосновывать оптимальные варианты построения, создания, использования, применения на всех стадиях жизненного цикла системы (ЖЦС).

Например, основными функциональными свойствами (ГПК) подводной лодки, как известно, являются ее скрытность, вооруженность, автономность, дальность плавания (районов действий), многозадачность, мореходность.

Обоснование оптимального соотношения между этими свойствами и ГПК, а также максимизация КПК

представляет собой **основную задачу анализа проектного качества (КПК) и эффективности (КПЭ)**, как соответствующей меры реализации КПК, исследовательского проектирования с целью поиска предпочтительных и оптимального вариантов проектных, организационных, технических, управленческих решений, обоснования перспективных путей развития ОИП данного класса.

В свою очередь, проектное качество и эффективность применения каждой подводной лодки в составе их группы (однородной и/или разнородной) обеспечивает новое системное качество и эффективность группы подводных лодок, оцениваемое соответствующими АСПК и ПСПК.

В результате ранее проведенного ряда исследований к настоящему времени созданы условия, обоснована целесообразность и реализована возможность инвариантного модельного представления современных структурно и функционально сложных ОИП и их систем в виде **Комплексной математической модели квалиметрической оценки, анализа, синтеза и оптимизации** ОИП (КММ КАСО) на основе соответствующей системы критериев.

На рис. 2 приведена в обобщенном виде предлагаемая структура и иерархия Системы критериев оценки проектного качества и эффективности эксплуатации типовых ОИП, под которыми будем понимать эргатические системы различных классов, включая ОМТИ.

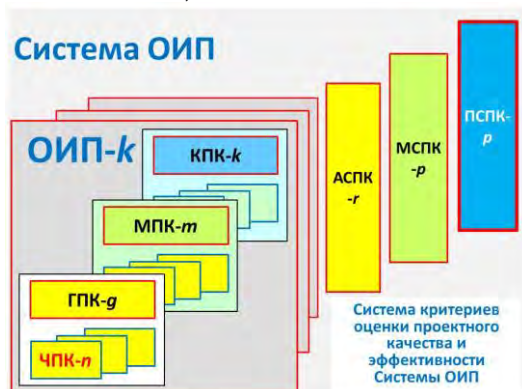


Рис. 2. Сравнение алгоритмов агрегирования

Инвариантная к специфике решаемых ОИП задач она позволяет количественно оценивать по задаваемым ЧПК объектовые и системные свойства ОИП. Это обеспечивается за счет агрегирования ЧПК в ГПК, МПК, КПК, АСПК, МСПК и в единый ПСПК однородных/разнородных ОИП. Включая ОМТИ и их системы типа судно, корабль, их группы, различного рода системы диспетчерского, оперативного и ситуационного управления, подсистемы управления техническими средствами, в том числе в защищенном исполнении.

Еще более значимыми подобные системные оценки являются при мониторинге, прогнозировании и управлении состоянием и качеством ОИП по критерию КПК, а в составе их систем - ПСПК.

2. Комплексная математическая модель агрегирования векторных показателей качества

В развитие [8] в таблице 1 приведены в обобщенном виде и структурированы основные методы и математические модели агрегирования векторных критериев оценки качества, оптимизации проектных решений ОИП, включая:

1. Обобщенный метод оценки и анализа показателей качества (ПК) с иерархической структурой, приведенной на рис. 2 и позволяющий по алгоритму (1) построить модель оценки КПК отдельного k – того ОИП Q_k путем задания ЧПК в качестве исходных данных с их последующим нормированием по алгоритмам (6.1) – (6.4) и агрегированием в ГПК, а далее – в МПК и в единый КПК для данного объекта проектирования.

2. Метод и математическую модель (2) оценки и анализа на основе полученных КПК конкурентной

способности (КС) ОИП по отношению к КПК соответствующего конкурентного объекта, оцениваемого по аналогии с моделью (1).

3. Метод и математическую модель (3) оценки и анализа перспективности развития (ПР) ОИП данного класса и типа в сравнении с ОИП предыдущего этапа развития, оцениваемого по аналогии с моделью (1).

4. Частные методы и математические модели (4)–(9) агрегирования показателей качества ОИП в составе модели (1), среди которых, как показано в ряде исследований [11-12] наиболее предпочтительным следует считать гармонический алгоритм свертки ПК по модели (5.4).

5. Методы и математические модели (10)–(16) синтеза предпочтительных вариантов построения и эксплуатации ОИП.

6. Квалиметрический метод и математические модели типа (17) полимодельный оптимизации качества ОИП.

7. Методы принятия решений ЛПР, как правило, с неформализуемыми алгоритмами оценки качества (КПК) и эффективности (КПЭ).

Тем самым, приведенная в табл. 1 КММ КАСО позволяет на системном уровне решать задачи концептуального, исследовательского и конструкторско-технологического обоснования эффективных и оптимальных структурно-функциональных проектных и эксплуатационных решений за счет специфики инвариантного квалиметрического моделирования сложных и разнородных объектов.

Эта возможность проявляется и реализуется в процессе, как правило, вариантного ИП, за счет:

- учета практически всей совокупности значимых показателей качества без ограничения их числа, содержания и каких-либо особенностей;
- масштабирования системы ОИП и показателей их качества, соответствующей технологической идентичности процедур агрегирования и инвариантности к специфике их функционирования;
- группирования (агрегирования) ЧПК в ГПК с учетом индексов критериальной значимости (ИКЗ, весовых коэффициентов) и их модели в виде соответствующей матрицы ИКЗ. Именно ГПК непосредственно отражают свойства отдельных ОИП (ОМТИ) и позволяют на этапе синтеза и оптимизации проектировщику управлять ими за счет выбора соответствующих соотношений между ГПК и ЧПК, учета их влияния на КПК, АСПК, МСПК, ПСПК;
- группирования (агрегирования) ГПК в МПК с учетом конкретной (частной) модели ИКЗ. Это позволяет при анализе КПК непосредственно анализировать и учитывать свойства моделей ИКЗ; группирования (агрегирования) МПК в КПК (с учетом своей модели ИКЗ), который отражает комплексное (сводное, интегральное) свойство ОИП по основному предназначению, рассматриваемое на множестве вариантов модельного представления (моделей ИКЗ). При этом, **анализ КПК** и соответствующих **системных свойств ОИП** позволяет качественно и количественно выявлять лицам обосновывающим (ЛОР) и принимающим решения (ЛПР) устойчивые признаки ОИП, *односторонне отличающие* его от других объектов или *характеризующие их общность*;

Таблица 1

Основные методы агрегирования векторных критериев оценки качества и оптимизации проектных решений ОМТИ

Методы агрегирования векторных критериев	Математическая модель алгоритмов свертки (агрегирования) и оптимизации проектного качества ОМТИ и их систем	Сравнительные свойства моделей, рекомендации по использованию
1. Обобщенный метод оценки и анализа комплексного показателя качества (КПК) отдельного объекта исследовательского проектирования (ОИП)	Алгоритм свертки n -ых частных показателей качества (ЧПК) в g -ые групповые (ГПК), m -ые модельные (МПК) и комплексный k -ый показатель проектного качества (КПК) отдельного ОИП (при эксплуатации - КПЭ) $Q_k = C_{k,M}^{t_n} \{w_m, C_{m,G}^{t_n} [w_g, C_{g,N}^{t_n}(w_n, q_n)]\}$ (1)	Инвариантность к специфике структуры, функционалу и свойствам отдельных ОИП. Возможность квалиметрической оценки, анализа, синтеза, оптимизации свойств и характеристик (ЧПК, ГПК, МПК и КПК) отдельных ОИП
2. Обобщенный метод оценки и анализа полимодельного системного показателя качества (ПСПК) системы ОИП	Алгоритм свертки k -ых КПК в r -ые однородные агрегированные системные и R разнородных системных показателей качества (АСПК), p -ые модельные и полимодельный показатель качества (ПСПК) системы ОИП $Q = C_r^{t_n} \{w_p, C_{p,R}^{t_n} [w_r, C_{r,K}^{t_n}(w_k, Q_k)]\}$ (2)	Инвариантность к специфике структуры, функционалу и свойствам системы (группы) ОИП. Возможность квалиметрической оценки, анализа, синтеза, оптимизации свойств и характеристик (АСПК, ПСПК) системы ОИП
3. Метод оценки и анализа конкурентной способности ОИП (КС) и их системы (КСС)	Алгоритм оценки КС отдельного ОИП и их системы по отношению к КПК конкурентного объекта Q_c и их системы Q_c $КС = Q_k / Q_c$ (3.1) $КСС = Q / Q_c$ (3.2)	Аналитическое решение задачи оценки КС и КСС для корпоративного, ведомственного и мирового рынков (уровней сопоставления)
4. Метод оценки и анализа перспективности развития ОИП (ПР) и их системы (ПРС)	Алгоритм оценки ПР отдельного ОИП и их системы по отношению к варианту развития ОИП на предыдущем этапе развития $Q_{э}$ и их системы $Q_{эс}$ $ПР = Q_k / Q_{э}$ (4.1) $ПРС = Q / Q_{эс}$ (4.2)	Аналитическое решение задачи количественной оценки ПР и ПРС для обоснования путей развития ОИП и их систем
5. Частные методы агрегирования показателей качества (ПК): 5.1. Метод равномерной оптимальности (МРО). Метод А.Н. Крылова	Частный оператор свертки n -ых ЧПК с индексами критериальной значимости (ИКЗ) w_n в g -ые ГПК по аддитивному (линейному) алгоритму $C_{g,N}^A = \sum_{n=1}^N (w_n, q_n)$ (5.1)	Оптимистическая (завышенная) оценка ПК. Определение индексов критериальной значимости (весовых коэффициентов) методом сводных (МСП) или методом рандомизированных сводных (МРСП) показателей качества
5.2. Метод справедливого компромисса (МСК). Принцип выбора Нэша.	Частный оператор свертки ЧПК по мультипликативному алгоритму $C_{g,N}^M = \prod_{n=1}^N q_n^{w_n}$ (5.2)	Пессимистическая (гарантированная) оценка показателей качества. Определение весовых коэффициентов на основе МСП или МРСП
5.3. Метод среднестепенной функции оптимальности (МСФ)	Частный оператор свертки ПК по среднестепенному алгоритму $C_{g,N}^S = (1/N) \times \left\{ \sum_{n=1}^N [C_{g,n}^S(w_n, q_n)]^p \right\}^{1/p}$ (5.3)	Проблема обоснования и интерпретации показателя степени $p \in (-\infty, +\infty)$ при ограниченном объеме статистических данных
5.4. Метод гармонической оптимальности (МГО)	Частный оператор свертки ПК по гармоническому алгоритму $C_{g,N}^H = [C_{g,N}^A(w_n, q_n) \times C_{g,N}^M(w_n, q_n)]^{1/2}$ (5.4)	Одновременное сочетание преимуществ МРО и МСК, нейтрализация недостатков МРО. Минимальная методическая погрешности оценки
5.5. Метод пессимистической оценки ПК и гарантированного результата (МГР)	Частный оператор свертки ПК по алгоритму максимизации минимальной (гарантированной) эффективности $C_{g,N}^P = \text{Min} [C_{g,N}^M(w_n, q_{n, \text{Min}})]$ (5.5)	Тактика «замораживания» резервов развития ОИП и их систем. Пессимистическая оценка ПК
5.6. Метод максимальной (гипотетической) эффективности (ММЭ)	Частный оператор свертки ПК по алгоритму максимизации максимальной (гипотетической) эффективности $C_{g,N}^M = \text{Max} [C_{g,N}^M(w_n, q_{n, \text{Max}})]$ (5.6)	Тактика «фиктивной» (оптимистической) оценки эффективности ОИП и их систем без учета ресурсных ограничений
6. Методы шкалирования 6.1. Обобщенный метод нормирования ЧПК со смещением шкалы	Обобщенный алгоритм естественной нормализации оценок ЧПК к диапазону изменения данных со смещением S_0 шкалы оценивания S $q = S_0 + (S - S_0) \times q_n^H$ (6.1)	Обязательное условия перехода от фактических значений и размерности ЧПК к их нормированным (нормализованным) значениям
6.2. Обобщенный метод естественной нормализации (нормирования) ЧПК без смещения шкалы оценивания	Обобщенный алгоритм естественной нормализации фактических значений ЧПК q_Φ к диапазону изменения данных ($q_{\text{Max}} - q_{\text{Min}}$) без смещения шкалы оценивания S_0 с учетом положительного ($h=1$) либо отрицательного ($h=-1$) характера влияния на КПК, степени нелинейности шкалы оценок P $q_n^H = \left\{ \frac{(q_\Phi - q_{\text{Min}})^h \times [q_{\text{Max}} - q_\Phi]^{1-h}}{q_{\text{Max}} - q_{\text{Min}}} \right\}^P$ (6.2)	Обеспечивает универсальность и инвариантность использования ЧПК, ГПК, МПК, КПК, АСПК, ПСПК в сопоставимых условиях и шкалах оценивания, возможность использования типовых моделей ИКЗ и ИСЗ, соответствующей интерпретации результатов оценивания
6.3. Частный случай естественной нормализации ЧПК методом сравнения (превосходства)	Частный случай естественной нормализации ЧПК при $h=1, q_{\text{Min}}=0, P=1$ $q_n^H = q_\Phi / q_{\text{Max}}$ (6.3)	Удобное использование шкалы сравнения с базовыми значениями ЧПК при анализе КС, ПР, а также при экспертном оценивании ЧПК
6.4. Нормализация Сэвиджа	Частный случай естественной нормализации ЧПК при $h=-1, q_{\text{Min}}=0, P=1$ $q_n^H = q_{\text{Max}} - q_\Phi$ (6.4)	Сложность сопоставления размерностей ЧПК и контроля при большом их числе
7. Методы синтеза ОИП 7.1. Методы ограничения ПК: 7.1.1. Метод последовательных уступок по ПК (МПУ)	Поиск квазиоптимального варианта ОИП по алгоритму последовательных уступок ΔQ по $(N-1)$ критериям качества, исключая значение $n=k$ $J_{\text{Сопт}}^{\Delta Q} = \text{ArgMax}_j [Q_j - [Q_k - \Delta Q]]$ (7.1.1)	Проблема оценки и интерпретации допустимых уступок ΔQ .
7.1.2. Метод ведущего ПК и фиксированных ограничений ПК (МФО)	Поиск квазиоптимального варианта ОИП по алгоритму перевода $(N-1)$ критериев в ограничения за исключением $n=k$ $J_{\text{Сопт}}^{\Phi} = \text{ArgMin}_j [Q_j^{\Phi} - Q_j]$ (7.1.2)	Проблема оценки и интерпретации ведущего ПК $Q_j^{\Phi}(q_k)$
7.2. Методы целевого программирования: 7.2.1. Метод идеальной точки по КПК (МИТ)	Поиск оптимального варианта ОИП по алгоритму идеальной (эквилибрантной) точки $J_{\text{Сопт}}^{\Phi} = \text{ArgMin}_j [Q_{\text{Max}}, Q_j]$ (7.2.1)	Проблема синтеза идеальной точки Q_{Max} . Проблема точности оценок ПК
7.2.2. Метод минимизации сумм нормированных отклонений АПК (ММО)	Поиск квазиоптимального варианта ОИП по алгоритму минимизации сумм отклонений ПК от целевого значения $Q_{ц}(q_k)$ с весом μ_k $J_{\text{Сопт}}^{\text{МО}} = \text{ArgMin}_j \left[\sum_k \mu_k \times Q(q_k) - Q_{ц}(q_k) ^r \right]^{1/r}$ (7.2.2)	Проблема интерпретации, «утопичности» точки $Q_{ц}(q_k)$ и оценки $r \in [1, +\infty]$
7.3. Методы поиска компромисса: 7.3.1. Метод эвристических решений (МЭР)	Поиск квазиоптимального варианта ОИП по алгоритму формирования и оптимизации приняты решения ЛПР $J_{\text{Сопт}}^{\text{МО}} = \text{ArgOpt}_j [\text{ЛПР}, \text{Extr}(Q_j^{\text{ЭП}}, n)]$ (7.3.1)	Проблема синтеза ЛПР структуры алгоритма, $Q_j^{\text{ЭП}}, n$
7.3.2. Метод комбинированного решения многовекторных задач (МКР)	Поиск квазиоптимального варианта ОИП по алгоритму решения многовекторных задач $J_{\text{Сопт}}^{\text{КР}} = \text{ArgMax}_j [\text{Min}[\text{Extr}(Q_j^{\text{КР}}(q_k))]]$ (7.3.2)	Проблематичность решения задачи синтеза алгоритма $\text{Extr}(Q_j^{\text{КР}}(q_k))$

<p>7.4. Методы интерактивного поиска: 7.4.1. Метод анализа и синтеза при информационном дефиците (АСПИД)</p>	<p>На основе алгоритма равномерной оптимальности с использованием метода имитационного моделирования для оценки весовых коэффициентов при введении отношений попарного предпочтения ЧПК. Прямое и обратное решение задачи обоснования выбора решений</p>	<p>Интерактивное использование программного комплекса (ПК) «ASPID-W», «APIS», реализующих метод АСПИД</p>
<p>7.4.2. Метод анализа иерархий Томаса Саати (МАИ)</p>	<p>На основе алгоритма равномерной оптимальности с использованием девяти-уровневой модели предпочтений для оценки весовых коэффициентов, их структуризацией и визуализацией</p>	<p>Интерактивный вариант реализации МАИ с использованием ПК «MPRIOR PY»</p>
<p>7.4.3. Метод максимизации индекса корневой чувствительности АПК (МКЧ)</p>	<p>На основе максимизации параметров с максимальным индексом корневой чувствительности</p> $J_{\text{Сопт}}^{\text{МКЧ}} = \text{ArgMax}_j \left\{ Q_j^{\text{МКЧ}} \left[\text{Max}_v \left(\frac{\Delta Q_v / Q_v}{\Delta q / q_v} \right) \right] \right\} \quad (7.4)$	<p>Интерактивный вариант программной реализации МКЧ с использованием автоматизированного ПК поддержки принятия решений «АСОР»</p>
<p>8. Полимодельный квалиметрический метод (ПКМ) системной оптимизации ОИП: 8.1. Метод модельных предпочтений и квалиметрической ранговой оптимизации (КРОПУР)</p>	<p>Одновременное интерактивное использование нескольких методов (МГО, МЭР, МКЧ, АСОП, оценки Q, КС, ЛПР), моделей предпочтений, вариантов условий, агрегирования получаемых оценок КПК, АСПК, ПСПК, их ранжирования, интерпретации и принятия решения ЛПР</p> $J_{\text{опт}} = \text{ArgMax}_j [\text{ЛОР, ЛПР, ЛИР, Max}_v Q(J_{\text{Сопт}}, \text{КС, ПР, КСС, ПРС})] \quad (8.1)$	<p>Взаимная верификация и актуализация моделей, условий и оценок АПК, оптимальных решений с использованием АСППР. Аналитическое решение задачи системной оптимизации методом числового моделирования (вариантного проектирования)</p>
<p>8.2. Метод анализа, синтеза и оптимизации проектных и управленческих решений (АСОР)</p>	<p>Многовариантная КРОПУР с анализом и синтезом решений на основе комплекса квалиметрических методов с их многомерной визуализацией, ранжированием, интерпретацией и оптимизацией</p>	<p>Типизация моделей предпочтений с интерактивной поддержкой оптимизации вариантов ОИП на основе ПК «АСОР»</p>
<p>8.3. Метод системной информационно-аналитической и интеллектуальной поддержки принятия решений, мониторинга, прогнозирования и управления ОИП (СПРУ, СОТМУ)</p>	<p>Полимодельная квалиметрическая информационно-аналитическая и интеллектуальная системная поддержка принятия решений ЛОР, ЛПР, ЛИР, организационно-технического мониторинга обстановки, ее прогнозирования и управления ОИП (СПРУ, СОТМУ) с целью минимизации (нейтрализации) негативного влияния (проявления) субъективных свойств ЛОР, ЛПР, ЛИР</p>	<p>Повышение качества обоснования и реализации управленческих решений за счет системной оптимизации управления ОИП лицами, обосновывающими решения (ЛОР), их принимающими (ЛПР) и исполняющими (ЛИР)</p>
<p>8.4. Метод ранговой партнерской сертификации качества ОИП (РПС), информационной прозрачности их оптимизации, управления, внедрения</p>	<p>Минимизация негативного влияния субъективных факторов экспертов за счет учета их компетенции, автоматического формирования результатов обработки и их коллективной интерпретации, верификации и оценки валидности, утверждения результатов оптимизации ОИП, СПРУ, СОТМУ группой экспертов</p>	<p>Повышение точности оценивания и достоверности оптимизации ОИП за счет концентрации компетенций и минимизации негативного влияния субъективных факторов экспертов</p>
<p>9. Методы обоснования решений ЛОР и их принятия ЛПР</p>	<p>Неформализуемые алгоритмы принятия решений: гибридный; роботизированный; с поддержкой решений; ситуационный; автоматизированный; нормативный; административный; демократический; эвристичный; диспетчерский; автократичный (без «информационной прозрачности» ПУР)</p>	<p>Критичность влияния «человеческого фактора» на оптимальность принимаемых проектных и управленческих решений и аварийность. Обеспечение «прозрачности» ПУР</p>

- группирования (агрегирования) КПК в АСПК, который отражает *агрегированное системное* (сводное, интегральное, обобщенное) *свойство* группы однородных или/и разнородных ОИП (как отдельного ОИП) в целом с учетом «своей» модели ИКЗ, каждый из которых отражает значимость данного ОИП в составе группы ОИП;

- группирования (агрегирования) АСПК из множества нескольких вариантов модельного представления (моделей ИКЗ) в так называемый **модельный системный** показатель качества (**МСПК**), отражающий специфику состава групп;

- группирования МСПК на множестве вариантов модельного представления в единый **полимодельный АСПК (ПСПК)** с учетом соответствующей модели ИКЗ и *отражающий агрегированное системное* (сводное, интегральное, обобщенное) свойство *системы ОИП* в целом с учетом своей модели ИКЗ, каждый из которых отражает значимость группы (однородных или/и разнородных) ОИП в составе системы ОИП на всех этапах ЖЦ и с учетом специфики функционирования каждого из ОИП в составе их системы.

Заключение

В результате проведения ряда поисковых и прикладных исследований обоснована целесообразность и возможность инвариантного модельного представления качества современных структурно сложных систем, а также мониторинга, прогнозирования и управления качеством.

На следующем этапе исследований, результаты которых представлены в отдельной статье,

планируется рассмотреть свойства алгоритмов агрегирования в сочетании со свойствами самого ППК системной оптимизации на основе многочисленных вариантов числового моделирования.

В результате обобщения и структурирования систематизированы основные методы и математические модели агрегирования векторных критериев оценки качества, оптимизации проектных решений объектов исследовательского проектирования, включая ОМТИ, в который вошли: обобщенный метод оценки и анализа показателей качества с представленной в табл. 1 иерархической структурой и использованием специально введенного *обобщенного оператора свертки*; методы и математические модели комплексного показателя качества ОИП, конкурентной способности и перспективности развития ОИП, включая ОМТИ, а также частные методы агрегирования; инвариантный метод и модель нормирования ЧПК со смещением шкалы; ряд методов синтеза; полимодельный метод системной оптимизации.

Представленный полимодельный квалиметрический метод системной оптимизации ОИП и комплексная математическая модель позволяют *на качественно новом уровне* решать задачи концептуального, исследовательского и конструкторско-технологического обоснования эффективных и оптимальных структурно-функциональных проектных и эксплуатационных решений за счет специфики инвариантного квалиметрического моделирования сложных и разнородных объектов.

Литература

1. Худяков Л.Ю. Исследовательское проектирование кораблей. – Л.: Судостроение, 1980. – 324 с.
2. Захаров И.Г. Обоснование выбора. Теория практики. – СПб.: Судостроение, 2006. – 528 с.
3. Преснухин В.В. Тенденции развития базовых и критических военных технологий / Оружие наследников Победы. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2015, с. 76-83.
4. Александров В.Л. О состоянии и перспективах развития судостроения в России / Деловая слава России, 28.12.2014, с. 13 - 17.
5. Микони С. В., Соколов Б. В. Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов : монография. — М.: РАН, 2018. – 314 с.
6. Субетто А.И., Алексеев А.В. Теория практики квалиметрического обеспечения развития морских автоматизированных систем / Актуальные проблемы морской энергетики: материалы седьмой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции в рамках Второго Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2018. С. 78 – 86.
7. Морская радиоэлектроника: Справочник / И.В. Соловьев, Г.Н. Корольков, А.А. Бараненко, М.Н. Баранов, А.В. Алексеев, Л.С. Васильев и др.; Под ред. В.А. Кравченко. СПб.: Политехника, 2003. – 246 с.
8. Алексеев А.В. Концептуальные аспекты управления развитием критических объектов морской техники и морской инфраструктуры // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал, № 2, Т.1, 2015, с. 47.
9. Алексеев А.В., Кузнецов В.В., Согонов С.А., Равин А.А., Хруцкий О.В. Морская энергетика как объект форсайта: аналитический обзор приоритетности развития технологических решений корабельной энергетики и автоматики / Актуальные проблемы морской энергетики: материалы девятой международной научно-технической конференции в рамках Четвертого Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2020, с. 15 - 22.
10. Бобрович В.Ю., Алексеев А.В., Антипов В.В., Смольников А.В., Шаталов Г.В. Модель и технология цифровизации управления инвестиционными проектами и развитием предприятия / Пятая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2019). Труды конференции (в рамках Международного Военно-морского салона «МВМС-2019») – М. Издательство Перо, 2019, с. 30-35.
11. Алексеев А.В. Алгоритмическое обеспечение оценки качества сложных эрготехнических систем типа судов повышенного риска / Региональная конференция (РИ-2012). Юбилейная XIII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2012)». Санкт-Петербург, 24-26 октября 2012 г.: Материалы конференции. \ СПОИСУ. – СПб, 2012, с. 152-153.
12. Волков В.И., Тычинин И.Ю., Алексеев А.В. Системные аспекты управления развитием современных критических объектов морской техники и морской инфраструктуры – Региональная информатика (РИ-2014). XIV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2014)». Санкт-Петербург, 29-31 октября 2014 г.: Материалы конференции. \ СПОИСУ. – СПб, 2014. С. 447-448.

References

1. Khudyakov L. Yu. Research design of ships. - L.: Shipbuilding, 1980. - 324 p.
2. Zakharov I. G. Justification of the choice. Theory of practice. Saint Petersburg: Sudostroenie, 2006, 528 p.
3. Presnukhin V. V. Trends in the development of basic and critical military technologies / Weapons of the inheritors of Victory. - Moscow: publishing house "Weapons and technologies", 2015, pp. 76-83.
4. Alexandrov V. L. About the state and prospects of development of shipbuilding in Russia / Delovaya Slava Rossii, 28.12.2014, p. 13-17.
5. Mikoni S. V., Sokolov B. V. Yusupov R. M. Qualimetry of models and polymodel complexes: monograph. - Moscow: RAS, 2018. - 314 p.
6. Subetto A. I., Alekseev A.V. Theory of practice of qualimetric support for the development of marine automated systems / Actual problems of marine energy: materials of the seventh all-Russian intersectoral scientific and technical conference within the Second all-Russian scientific and technical forum "Ship power engineering: from the past to the future". Saint Petersburg: Spbgmtu Publishing House, 2018. Pp. 78-86.
7. Marine Radioelectronics: Handbook / I. V. Solovyov, G. N. Korolkov, A. A. Baranenko, M. N. Baranov, A.V. Alekseev, L. S. Vasiliev, etc.; edited by V. A. Kravchenko. Saint Petersburg: Politechnika, 2003. - 246 p.
8. Alekseyev A.V. Conceptual aspects of managing the development of critical objects of marine technology and marine infrastructure // Marine intellectual technologies. The scientific journal № 2 (28) vol. 1, 2015, pp. 47– 57.
9. Alekseev A. V., Kuznetsov V. V., Magonov S. A., Ravin A. A., O. Khrutsky V. Marine energy as an object of foresight: analytical review of priority development of technological solutions for ship energy and automation / Actual problems of marine energy: proceedings of the ninth international scientific-technical conference in the framework of the Fourth all-Russian scientific-technical forum "Naval energy: from past to future". Saint Petersburg: Spbgmtu Publishing house, 2020, p. 15-22.
10. Bobrovich V. Yu., Alekseev A.V., Antipov V. V., Smolnikov A.V., Shatalov G. V. Model and technology of digitalization of investment project management and enterprise development / Fifth international scientific and practical conference "Simulation and complex modeling of marine equipment and marine transport systems" (ICM MTMTS-2019). Proceedings of the conference (within the framework Of the international Naval salon "mvms-2019") - M. Pero Publishing house, 2019, pp. 30-35.
11. Alekseyev A.V. Algorithmic assurance of quality assessment of complex ergotechnical systems of the type of high-risk vessels / Regional conference (RI-2012). Anniversary XIII St. Petersburg international conference " Regional

- Informatics (RI-2012)". Saint Petersburg, October 24-26, 2012: conference Proceedings. \ SPOIS. – Saint-Petersburg, 2012, pp. 152-153.
12. Volkov V. I., tychinin I. Yu., Alekseev A.V. System aspects of managing the development of modern critical objects of marine technology and marine infrastructure-Regional Informatics (RI-2014). XIV St. Petersburg international conference " Regional Informatics (RI-2014)". Saint Petersburg, October 29-31, 2014: conference Proceedings. \ SPOISU. - SPb, 2014. P. 447-448.

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

УДК 629.12.001.2
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.027

Проектная оценка прочностной безопасности судна при столкновении

А.И. Гайкович¹, А.А. Родионов¹, Вай Ян Вин Хтве¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье описывается подход к оценке прочности судна при столкновении на начальных стадиях проектирования. Показывается, что требования Российского Морского Регистра Судоходства (РМРС) по непотопляемости определяют такую величину расчетной пробоины, при которой часть продольных связей судна будет неминуемо разрушена. Возникает опасность потери общей прочности судна при продольном изгибе, поэтому уже в начальных стадиях проектирования необходима оценка прочности тараненного судна. Таким способом оценки может стать расчет продольной прочности судна с использованием приведенных толщин продольных связей корпуса. Проведено статистическое исследование приведенных толщин основных продольных связей корпуса в функции толщины обшивки днища. Показана возможность оценки момента сопротивления с использованием предложенных зависимостей на примере сухогрузного судна проекта 1590. Для оценки прочности тараненного судна с произвольным типом конструктивного мидель-шпангоута создан пакет программ в оболочке Delphi. С его помощью рассчитывали напряжения в продольных связях корпуса в зависимости от глубины пробоины. Приведен график, показывающий результат такого исследования. Предложена оценка уровня безопасности судна при столкновении.

Ключевые слова: судно, проектирование, прочность, столкновение.

Design assessment of ship strength safety in case of collision

Alexander I Gaykovich¹, Alexander A. Rodionov¹, Wai Yang Win Htwe¹

¹Saint Petersburg State Maritime Technical University

Abstract. The article describes the approach to assessing the strength of a vessel in a collision at the initial stages of design. It is shown that the requirements of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS) on the unsinkability of the op-distribution of such a value of the design hole, at which part of the vessel's longitudinal connections will be inevitably broken once and for all. There was a risk of losing the overall strength of the vessel at longitudinal bending, so an assessment of the strength of the defective vessel was needed in the initial design. This method of evaluation may be to calculate the longitudinal strength of the vessel using the reduced longitudinal bond thicknesses of the hull. Static analysis of the reduced thickness of the main longitudinal ties of the housing as a function of the thickness of the bottom skin was carried out. The possibility of estimating the resistance moment using the proposed dependencies is shown in the example of a dry cargo vessel of project 1590. A Delphi shell software package has been created to assess the strength of a carriage vessel with an arbitrary type of const-hose midframe. It calculated the stresses in the longitudinal ties of the housing depending on the depth of the hole. A graph showing the result of such a study is given. Proposed is assessment of ship safety level in case of collision.

Keywords: ship, design, strength, collision.

Введение

Столкновение судов по статистике за 2005 – 2015 годы составляют 22% от очень серьезных аварий по классификации EMSA (Европейское Агентство Морской Безопасности) [1]. Согласно EMSA серьезная авария подразумевает полную потерю судна (7%), смертельный случай или значительное загрязнение [2].

Потеря судна при столкновении возникает многих причин, в том числе и потери прочности. Общая прочность судна обеспечивается конструкцией корпуса, которая, в свою очередь, определяется уже на начальных стадиях проектирования. Правила РМРС регламентируют размеры основных судовых перекрытий для неповрежденного судна [3]. В то же время Правила определяют расчетную пробоину в случае затопления длиной не менее 14,5 м, под прямым углом к диаметральной плоскости на глубину 0,2 ширины тараненного судна и по высоте от основной плоскости неограниченно вверх [4]. Очевидно, что часть конструкций, входящих в состав эквивалентного бруса будут разрушены. Следовательно, необходимо убедиться, что судно не разломится.

Это условие может быть ограничением в задаче оптимизации основных кораблестроительных характеристик уже на начальных стадиях проектирования и может быть представлено в виде:

$$\sigma_{пс} < \sigma_{доп} \quad (1)$$

где $\sigma_{пс}$ – максимальное напряжение в продольных связях тараненного судна; $\sigma_{доп}$ – допустимые напряжения, обеспечивающие продольную прочность.

Определение приведенных толщин продольных связей.

Напряжение в продольных связях поврежденного судна определяется материалом и конструктивной схемой набора корпуса:

$$\sigma_{пс} = M_p / W_{пс} \quad (2)$$

где M_p – расчетный изгибающий момент, вызывающий общий изгиб корпуса; $W_{пс}$ – момент сопротивления эквивалентного бруса для крайней связи.

Продольные связи на начальном этапе проектирования могут характеризоваться приведенными толщинами, т.е. толщиной связи, которая включает как фактическую толщину данной

связи, так и «размазанную» площадь продольного набора [5]. В работе [5] рекомендуются соотношения между приведенными толщинами продольных связей в функции приведенных толщин обшивки днища δ_0 и верхней расчетной палубой δ_1 . Значения этих толщин задают момент сопротивления эквивалентного бруса как для неповрежденного, так и для поврежденного корабля.

В задаче оптимизации основных кораблестроительных характеристик корабля эти приведенные толщины могут рассматриваться как оптимизируемые переменные.

Поиск оптимальной топологии конструктивного мидель-шпангоута является сложной задачей структурной оптимизации. Для упрощения оптимизационной задачи будем считать конкретный вариант топологии конструктивного мидель-шпангоута заданным. А общий результат оптимизации буде получен выбором из набора возможных топологических схем.

Для этого все продольные связи корабля делятся на базовые и дополнительные.

В базовые продольные связи входят: обшивка днища, вертикальный киль, горизонтальный киль, настил двойного дна, средний лист двойного дна, междудонный лист, скуловой лист, обшивка борта, ширстрек, верхняя палуба, палубный стрингер.

К дополнительным продольным связям относятся: днищевой стрингер, нижняя палуба или платформа (если она учитывается в расчете общей продольной прочности), обшивка двойного борта и продольная переборка, бортовой стрингер, комингс – карлингс, карлингсы.

Выбор дополнительных конструктивных элементов позволяет получить любой вариант конструктивного мидель-шпангоута.

Было проведено статистическое исследование для соотношений приведенных толщин для некоторых типов гражданских судов. Причем, для уменьшения размерности оптимизационной задачи рассматривались все приведенные толщины δ_i в функции приведенной толщины обшивки днища δ_0 :

$$\delta_i = k_i \cdot \delta_0 \quad (3)$$

Значения коэффициента k_i в (3) приведены в табл.1.

Для некоторых связей коэффициент в (3) назначен или получен пересчетом с прототипа.

Число днищевых стрингеров определяется Правилами [3] в п. 2.4.2.4. исходя из того, что при наличии двойного дна расстояние между стрингерами, до борта или от вертикального киля, при поперечной системе набора не должно превышать 4,2 м, а при продольной системе набора не более 5,0 м.

Число бортовых стрингеров Правилами [3] оговариваются только в п. 2.5.2.3. относящегося в конструкцию машинного отделения. В первом приближении, число бортовых стрингеров для гражданских судов можно определить по прототипу, либо по статистике, в зависимости от высоты борта:

$$N_{bc} = 0,375 \cdot H \quad (4)$$

Число карлингсов в первом приближении, для гражданских судов можно определить по прототипу, либо по статистике, в зависимости от ширины судна:

$$N_{кар} = 0,12 \cdot B \quad (5)$$

Таблица 1.

Формулы для определения приведенных толщин продольных связей в эквивалентном брус

№ п/п	Наименование связи	Математическое ожидание множителя k_i	Относительный размах интервала k_i , %
БАЗОВЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ СВЯЗИ			
1	Обшивка днища	1	–
2	Вертикальный киль	0,85	41
3	Горизонтальный киль	1,15	30
4	Настил двойного дна	0,85	18
5	Средний лист 2-го дна	1,05	33
6	Междудонный лист	0,90	33
7	Скуловой лист	1,00	20
8	Обшивка борта	1,00	30
9	Ширстрек	1,30	23
10	Настил верхней палубы δ_1	1,30	23
11	Палубный стрингер	1,35	26
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ СВЯЗИ			
12	Днищевой стрингер	0,80	25
13	Нижняя палуба	0,85	18
14	Обшивка двойного борта	1,30	8,0
15	Бортовой стрингер	0,80	–
16	Комингс-карлингс	0,80	–
17	Карлингс	0,80	–
18	Продольная переборка	0,60	33

Определение элементов эквивалентного бруса

Для определения момента сопротивления эквивалентного бруса для крайней связи необходимо знать ширину или высоту продольных связей, входящих в эквивалентный брус. Расчетные формулы для геометрических характеристик продольных связей приведены в табл. 2. Они получены из Правил [3], пересчитаны с прототипов или назначены.

Аппликата нейтральной оси для транспортных судов по Л.М. Ногиду [6]:

$$Z_{но} = 0,126 \cdot L^{1/4} \cdot H \quad (6)$$

где L – длина по КВЛ, H – высота борта на миделе.

Предполагается, что в результате тарана аппликата нейтральной оси не измениться.

Момент инерции расчетного поперечного сечения корпуса относительно нейтральной оси –

$$I = 2 \cdot [C^1 - (B^2 / A)] \quad (7)$$

где А – суммарная площадь сечения; В – суммарный статический момент продольных связей; С¹ – суммарный момент инерции продольных связей.

Таблица 2.

Формулы для определения ширины продольных связей в эквивалентном брус

№ п/п	Наименование связи	Расчетная формула для расчета ширины или высоты связи, м	Пункт РМРС [3]
БАЗОВЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ СВЯЗИ			
1	Обшивка днища	В	–
2	Вертикальный киль	$\max\{[(L-40)/570 + 0,04 \cdot B] + 3,5 \cdot T/L, 0,65\}$	2.4.4.1
3	Горизонтальный киль	$\min\{0,8 + 0,005 \cdot L, 2,0\}$	2.2.4.4
4	Настил двойного дна	$B - b_{сл}$	–
5	Средний лист 2-го дна	$0,0035 \cdot L + 0,9$	[7]
6	Междудонный лист	$1,4 \cdot h_{вк}$	–
7	Скуловой лист	$(0,86 - 0,78 \cdot \delta) \cdot (B \cdot T)^{1/2}$	[6]
8	Обшивка борта	$H - h_{ш}$	–
9	Ширстрек	$\min\{0,8 + 0,005 \cdot L, 2,0\}$	2.2.4.5
10	Настил верхней палубы	$B - b_{л}$	–
11	Палубный стрингер	$\min\{0,8 + 0,005 \cdot L, 1,8\}$	2.6.4.1.4
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ СВЯЗИ			
12	Днищевой стрингер	$\max\{[(L-40)/570 + 0,04 \cdot B] + 3,5 \cdot T/L, 0,65\}$	2.4.4.1
13	Нижняя палуба	$B - b_{л}$	–
14	Обшивка двойного борта	Н	–
15	Бортовой стрингер	$0,02 \cdot H$	[7] П*
16	Комингс-карлингс	$0,01 \cdot H + 1,2$	–
17	Карлингс	$0,01 \cdot H$	–
18	Продольная переборка	Н	--

L – длина по КВЛ, В – ширина на миделе, Т – осадка в полном грузу, Н – высота борта на миделе, b_{сл} – ширина среднего листа 2-го дна, h_{вк} – высота вертикального киля, h_ш – высота ширстрека, b_л – ширина люка, П* – прототип

Расчет прочностной безопасности

Изгибающий расчетный момент определяется по известному соотношению:

$$M_p = D \cdot L/k \quad (8)$$

где D – водоизмещение корабля, L – длина по КВЛ, k – коэффициент суммарного изгибающего момента на подошве или на вершине волны.

Адекватность расчета момента сопротивления проверялась на проекте сухогрузного судна проекта 1590, схематичный конструктивный мидель-шпангоут показан на рис. 1.

Характеристики судна:

Длина по КВЛ (L) 123,7 м

Ширина по КВЛ (В) 17,0 м
 Высота борта (Н) 10,0 м
 Осадка в полном грузу (Т) 7,0 м
 Полное водоизмещение (D) 10767 т

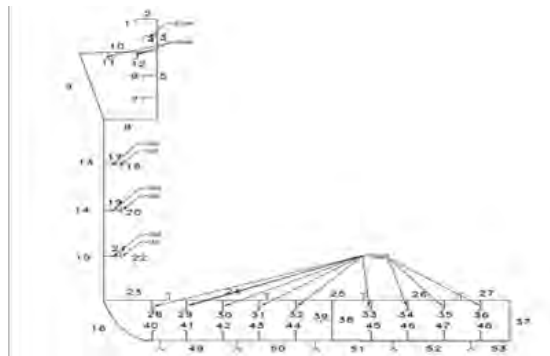


Рис. 1. Схематичный конструктивный мидель-шпангоут проекта 1590.

Величина момента сопротивления по чертежу составила 35364 м.см², а по предложенным формулам 37438 м.см². Подобное расхождение можно считать приемлемым для начальных стадиях проектирования.

Схема столкновения показана на рис. 2.

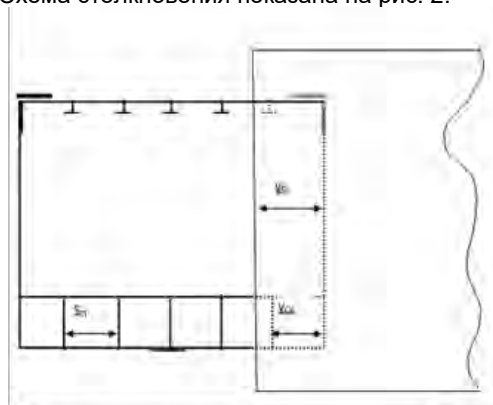


Рис. 2. Схема столкновения.

Напряжения в работающих продольных связях тараненного судна зависят от глубины проникновения таранящего судна.

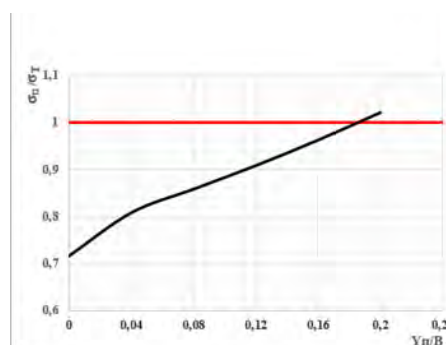


Рис. 3. Влияние глубины пробоины на напряжения

На рис. 3. показан график роста напряжений в зависимости от глубины проникновения таранящего удара, применительно к проекту 1590. При проникновении больше 0,18 ширины судна, оно разломится.

Для определения напряжений в продольных связях судна после тарана используется программный комплекс, использующий соотношения, описанные выше. Комплекс построен в оболочке Delphi. Пример интерфейса комплекса показан на рис. 4.



Рис. 4. Пример интерфейса комплекса оценки безопасности при столкновении

Глубина повреждения уп рассматривается как исходная величина.

Для оценки конструктивной безопасности при столкновении на начальных стадиях проектирования предлагается функция вида:

$$V_{пр} = 1 - \frac{\sigma_{п}}{\sigma_{т}^*} \quad (9)$$

где $\sigma_{п}$ – получено при расчете последствий столкновения; $\sigma_{т}^*$ – предел текучести материала. Если оценка $V_{пр}$ отрицательна, то общая оценка безопасности судна будет считаться равной 0.

Заключение

Требования к прочностной безопасности должна учитываться на всех этапах проектирования судна, поскольку дополняет требования РМРС в части непотопляемости.

Приведенный в статье подход позволяет учитывать требования прочностной безопасности при столкновении уже в начальных стадиях проектирования. Предложенная оценка конструктивной безопасности может быть включена как функциональное ограничение в задаче оптимизации характеристик проектируемого судна.

Литература

1. EMSA. Annual overview of marine casualties and incidents 2015. <http://www.emsa.europa.eu>
2. Allianz Global Corporate&Specialty. Safety and Shipping Review 2016. <http://www.agcs.allianz.com/>
3. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус. – СПб., РМРС, 2016
4. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. V. Деление на отсеки. – СПб., РМРС, 2016
5. Короткин Я.И., Ростовцев Д.М., Сиверс Н.Л. Прочность корабля. – Л., изд. «Судостроение», 1974, 432 с.
6. Ногид Л.М. Проектирование формы корпуса и построение теоретического чертежа. – Л., изд. Судпромгиз, 1962, 243 с.
7. Поляков А.В., Стадников А.А. Расчеты судовых корпусных конструкций. – Л., изд. «Судостроение», 1974, 184 с.

References

1. EMSA. Annual overview of marine casualties and incidents 2015. <http://www.emsa.europa.eu>
2. Allianz Global Corporate&Specialty. Safety and Shipping Review 2016. <http://www.agcs.allianz.com/>
3. Rules for the classification and construction of sea-going vessels. Part II. Hull. – SPb., RMRS, 2016
4. Rules for the classification and construction of sea-going vessels. Part V. Division into compartments. – SPb., RMRS, 2016
5. Korotkin Ya.I., Rostovtsev D.M., Sivers N.L. Prochnost of the ship. – L., prod. "Shipbuilding," 1974, 432 p.
6. Nogid L.M. Design of a form of the case and creation of the theoretical drawing. – L., prod. Sudpromgiz, 1962, 243 p.
7. Polyakov A.V., Stadnikov A.A. Calculations of ship case designs. – L.,prod. "Shipbuilding," 1974,184 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Александр Александрович Родионов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной механики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

Вай Ян Вин Хтве, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kogugu90@gmail.com

Alexander I. Gaykovich, Dr. Sci. (Eng), professor, professor of department of design of vessels, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: a_gaikov@mail.ru

Alexander A. Rodionov, Dr. Sci. (Eng), professor, Head of the department of construction mechanics, St. Petersburg State Maritime Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

Vai Jan Win Htwe, graduate student, St. Petersburg State Maritime Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kogugu90@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 628.54

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.047

Разработка технико-технологических решений по вторичному использованию буровых шламов на морских платформах арктического региона

С.В. Пискунова¹, Ю.А. Нифонтов¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В процессе деятельности предприятий нефтегазовой отрасли образуется большое количество нефтесодержащих отходов. Использование твердых буровых шламов имеет немаловажное значение для народного хозяйства как с точки зрения улучшения экологии (ликвидация накопленных отходов), так и в плане повышения эффективности работы предприятий отрасли (рациональное использование природных ресурсов). Цель работы заключается в разработке технико-технологических решений по вторичному использованию отходов предприятий нефтегазового комплекса и упрощения процесса их транспортировки. Актуальность и современность данного исследования обусловлена накоплением значительного количества нефтесодержащих отходов, которые снижают экологическую и экономическую эффективность предприятий данной отрасли промышленности. Использование твердых отходов нефтегазовой отрасли в качестве вторичного ресурса представляет практический интерес с точки зрения экологической и экономической эффективности. Основным результатом проведенной научно-исследовательской работы выступает концептуальная проработка технологии утилизации указанных отходов путем формования с получением экологически чистого строительного материала.

Ключевые слова: буровые шламы, буровые отходы, утилизация шламов, импортозамещение, формование, нефтяные месторождения, бурение, нефтегазовая промышленность, арктические нефтяные месторождения, шельф.

Development of the technical and process design details on secondary use of drilling cuttings on marine platforms of the arctic region

Sofya V. Piskunova¹, Yuri A. Nifontov¹¹State marine technical university of Saint-Petersburg

Abstract. During the process of oil and gas industry, a large amount of oil-contaminated waste is generated. The use of solid drilling cuttings plays a key role in the national economy, both from the point of view of improving the environment (elimination of accumulated waste), and in terms of improving the efficiency of enterprises in the industry (rational use of natural resources). The work objective is to develop technical and process design details on secondary use of the wastes of oil and gas complex enterprises, and to simplify the process of its transportation. Relevance and contemporaneity of the research is conditioned upon accumulation of the significant quantity of oil-contaminated waste which reduces ecological and economical efficiency of oil and gas complex enterprises.

The use of solid oil and gas wastes as a secondary resource is of practical interest from the point of view of ecological and economical efficiency of the enterprises. The main result of the research is a conceptualization of the disposal technology of the wastes mentioned above by moulding, to produce environmentally friendly building material.

Keywords: drilling cuttings, drilling wastes, utilization of the cuttings, import-substitution, moulding, oil deposits, drilling, oil and gas industry, Arctic oil deposits, shelf.

Введение

На современном этапе ключевым фактором обеспечения устойчивости и развития нашей страны является ее нефтегазовый потенциал. Значительная доля макроэкономических параметров российской экономики — результат дохода от экспорта российского газа и нефти. Фактически данные отрасли промышленности являются стратегической опорой государства: это и база, обеспечивающая стабильность страны, и основа развития ее экономики. Но даже будучи довольно развитой структурой, нефтегазовая промышленность России требует совершенствования и привлечения дополнительных инвестиций. И поэтому одной из актуальных задач является освоение новых нефтегазовых месторождений, повышение эффективности и экологической безопасности

добычи, транспортирования и переработки энергоресурсов [1].

Технический прогресс, достигаемый в этом направлении за счет увеличения объемов добычи нефти и газа, сопровождается соответствующим увеличением объемов загрязнений и отходов. Это влечет существенные изменения в области экологической обстановки.

Кроме этого, геологоразведочные и нефтегазодобывающие предприятия, при разведке месторождений, добыче, хранении и первичной переработке углеводородов при подготовке их к транспортированию, работающие при высоких давлениях и температурах с высокотоксичными, пожаро- и взрывоопасными веществами, являются еще и источниками повышенного технологического и экологического риска.

Особые условия работы возникают при морской добыче нефти и газа: операции на платформах, сейсмическая разведка, установка подводных хранилищ, прокладка морских трубопроводов, строительство шельфовых и береговых терминалов, танкерные перевозки, судоходство, вертолетный транспорт, взрывные работы, и др. Все это говорит о том, что ограничивать развитие углеводородных проектов в Арктическом регионе должна не только экономическая составляющая, но и экологическая. При этом обеспокоенность природоохранной организацией объективно вызывает, в первую очередь, добыча нефти в арктической климатической зоне. Арктический регион является исключительно уязвимой территорией [2, 3].

1. Экологический вектор развития нефтегазовой отрасли

Ресурсный потенциал нефтедобывающего комплекса позволяет сохранять текущий высокий уровень добычи, а газового – существенно ее нарастить. Но все это не может осуществляться без постоянного прироста запасов углеводородов, который может быть обеспечен лишь открытием и освоением новых месторождений главным образом в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, а в ближайшем будущем и на континентальном шельфе Арктики. То есть, в регионах с отсутствием развитой инфраструктуры, серьезными трудностями в отношении доступности, разведки, добычи и транспортирования необходимых материалов, оборудования и добываемых природных ресурсов.

Отсутствие развитой инфраструктуры, в том числе, объектов переработки и размещения отходов производства и потребления, многотоннажных отходов бурения разведочных и эксплуатационных скважин, добычи и первичной переработки углеводородов: твердых буровых отходов и шламов, отработанных буровых и технологических жидкостей, сточных и попутных вод, и др.

При этом в отличие от типичных видов отходов производства и потребления, в отношении буровых шламов, загрязненных углеводородами, являющихся неизбежными и характерными многотоннажными отходами при всех видах буровых работ, загрязняющих поверхностные и подземные водные объекты, недра, почву и атмосферу, негативно воздействующих на растительный и животный мир отсутствуют, либо не применяются из-за технической сложности, эффективные и общепринятые методы утилизации, что в свою очередь снижает эколого-экономическую эффективность предприятий отраслей нефтегазодобывающей промышленности [4].

2. Технологические аспекты

В настоящее время известно множество способов утилизации отходов бурения, большинство из которых сводится к захоронению, либо размещению буровых шламов на территории месторождений в специально отведенных местах (шламохранилищах, земляных амбарах и т.п.) в незначительных объемах перерабатываются в почвенные грунты. Однако, наиболее перспективным направлением утилизации буровых шламов представляется их использование при производстве строительных материалов, грунтовых смесей, материалов для отсыпки

внутрипромысловых дорог и буровых площадок [4]. Однако, разнообразие состава и свойств буровых шламов, недостаточная изученность их характеристик, в том числе токсичности и способов ее снижения, не позволяют в настоящее время этим направлениям утилизации получить широкое распространение. Проектными решениями на разработку новых месторождений нефти и газа, целесообразно рассматривать экономически доступные и технологически подготовленные к внедрению эффективные методы, одним из которых является обезвоживание и измельчение буровых шламов последующим окускованием полученной массы способом формования. Данный метод позволит заметно сократить объем вывозимых отходов на объекты размещения и значительно уменьшить воздействие шламов на окружающую среду.

Формование (брикетирование) находит широкое применение в практике утилизации твердых отходов в качестве подготовки с целью придания отходам компактности, обеспечивающей лучшие условия транспортирования, хранения, а часто и саму возможность переработки или самостоятельной операции с изготовлением товарных продуктов [4].

3. Применение способа формования в процессе утилизации буровых шламов

Особенностью предлагаемого способа является состав основного технологического оборудования и последовательность операций.

К числу первых операций относится сушка шлама. При этом искусственная сушка предпочтительнее, чем солнечная-воздушная. Что объясняется:

- возможностью применения в любых природно-климатических зонах страны;
- большой механизацией производственных процессов, лучшими санитарными условиями и выработкой оборудованием избыточного тепла;
- компактностью и меньшей продолжительностью сушки.

Просушенный буровой шлам перед формованием проходит два основных этапа: измельчение дроблением до получения состава фракций по классам крупности, позволяющих обеспечить максимальную упаковку частиц при формовании; подготовка шихты с близким к оптимуму количеством связующих материалов.

1. Измельчение до класса –3 мм осуществляется способом дробления с возможностью использования достаточно большого спектра типоразмеров дробилок. К наиболее применяемым относится щековая дробилка. Для использования в условиях МБП целесообразно применение ДЦ 100×200-01 или ЦДС 180×250 в зависимости от планируемого объема буровых работ, для разделения сыпучих материалов по крупности – вибросит типоразмера В11-В13.

Максимальная упаковка частиц при формовании возможна при ситовой характеристике, называемой смесью Фуллера-Томпсона, при которой фракции классов крупности 0-3 мм составляют ряд: более 3 мм – 5-10 %; 1-3 мм – 45-50 %; 0-1 мм – 40-45 %.

При отсутствии в ситовом составе фракции классов крупности >3 мм, представляется возможным сместить предлагаемую шкалу оптимальной смеси вправо, с принятием числовых

значений фракций крупности на соответствующем классическому уровню.

Оптимальная ситовая характеристика шихты определяется методом подбора классификацией на виброситах при бурении первых скважин разрабатываемого объекта.

2. Подготовка шихты с близким к оптимуму количеством связующих материалов достигается как измельчением компонентов, так и их смешением. Качество последнего характеризуется степенью смешения. Наиболее рациональным представляется подход к оценке степени смешивания компонентов М. Э. Купершмидта, разработанный и примененный им для силикатных смесей [5].

При этом качество обработки минеральных смесей оценивается по обобщенному критерию, имеющему физический смысл и учитывающему процессы смешения и измельчения одновременно. За такой критерий принимается число контактов между компонентами смеси. Это основано на том, что химические реакции в смеси идут по поверхности контактов между компонентами. Поэтому для интенсификации химических реакций и повышения прочности новообразований требуется увеличить количество контактов между компонентами формовочной шихты. Результаты расчетов позволяют сделать выбор рационального содержания компонентов шихты с учетом количества ключевого компонента (цемента) исходя из расчетного числа контактов частиц.

$$n = \frac{0,2 \exp[-2,9(2a-1)^4] - D \exp[2,1(2a-1)^4]}{3,6 \cdot 10^2 \cdot \gamma_1 \cdot d^3} \quad (1)$$

где n – количество контактов между компонентами смеси;

a – оценка математического ожидания содержания ключевого компонента;

D – оценка дисперсии содержания ключевого компонента;

d – средний диаметр частиц шихты.

γ_1 – плотность высушенного шлама, кг/м³.

На данном этапе исследований результаты экспериментальной проверки упаковки частиц шихты на основе сокращенной пробы бурового шлама (8 кг) шельфового объекта, отобранного на лицензионном участке российского сектора Балтийского моря в интервале глубин 750-570 м палеозойской толщ (ранний кембрий) осадочного чехла Балтийской синеклизы, с предложенными размерностями объединенных фракций различных классов крупности полусухим формованием подтверждают правомочность данного решения – полученные образцы имели прочность на сжатие в пределах 247,3-282,3 кг/см².

Таким образом, результатами проведенной оценки прочностных свойств полученных образцов подтверждается соответствие гранулометрического состава смеси оптимальному ситовому составу, пригодному для практического использования при брикетировании.

В качестве связующего материала для формования изделий из данного вида буровых шламов предлагается использовать тампонажный цемент М-600. Экспериментально подтвержден следующий оптимальный состав смеси: шлам – 93±92 %; цемент – 7±8 %. Полученная смесь увлажнялась (до содержания влаги общей $W_{\text{общ}} = 14 \pm 15$ %).

Процесс формования шихты подобного качества с целью получения строительных материалов проходит посредством специального оборудования различной мощности.

В практике формования твердых отходов используют различные прессовые механизмы. При выборе типоразмера прессового устройства прежде всего руководствуются уровнем энергоемкости процесса (кВт/тн), потребляемой мощностью электроэнергии, производительностью (т/час), usability формования, ремонтпригодностью и габаритными размерами.

Наибольшее распространение получили штемпельные ($P_{\text{пресс.}} = 10-12$ МПа), вальцовые и кольцевые (~20 МПа), гидравлические (>25 МПа) и экструдерные (шнековые) прессы различных конструкций. Для последних характерен самый низкий удельный уровень энергоемкости процесса. Например, расход прессы ЭУТБ (Б.Н. Лукьянец) с производительностью 3±5 т/час не превышает 1,5 кВт·час на тонну изделия при габаритных размерах 2000 × 1000 × 700 мм и массе 200-250 кг.

Объяснение данного эффекта заключается в том, что при комбинировании осевого сжатия шихты с одновременным вращением (Рис. 1), характерным для начальной части матричного канала с питающим шнеком при экструдерном формовании, достигаются большие степень сжатия и упаковки частиц шихты при равных, и даже значительно меньших затратах энергии, чем при осевом сжатии в гидравлическом или штемпельном прессах [6, 7].

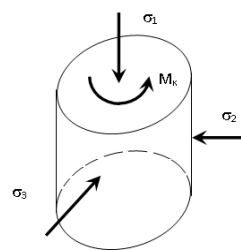


Рис. 1 Схема приложения сил к прессуемой шихте в начале матричного канала экструдерного прессы

Учитывая высокий уровень энергоэффективности экструдерного прессы и его компактность, а также высокую степень надежности, при проектировании технологической линии формования твердопластичных отходов (буровых шламов) на морской буровой платформе целесообразно отдавать предпочтение экструдерной прессовой установке.

4. Предварительная оценка прочностных свойств и структуры изделия

При изготовлении образцов строительных изделий на стадии пилотных испытаний применялся лабораторный ударный пресс конструкции Б.Н. Лукьянца для формования «наклепом» изделий (брикетов) трапецевидной формы.

В качестве сырья использовались, упомянутые выше буровые шламы, отобранные на шельфовом объекте в российском секторе Балтийского моря Калининградского региона РФ, с насыпной плотностью $1,27 \text{ г/см}^3$ (Рис. 2), представленные в основном, мраморизованными известняками (пески, глины).

В результате химико-токсикологического анализа установлено, что данные буровые шламы относятся к малоопасным веществам 4-го класса опасности.

После формования и отверждения брикетов было выполнено определение предела прочности на сжатие брикетов, значение которой варьировалось в интервале $247,3 \div 282,3 \text{ кг/см}^2$. Что соответствует марке прочности изделий (кирпича) М 250, величина плотности ($\rho = 2,06 \text{ г/см}^3$) – классу плотности изделия 2.4 [8].

Как видно из результатов определения, значение плотности готового образца превышает величину насыпной плотности материала из которого были изготовлены образцы почти в 2 раза (Рис. 3), что обеспечивает сокращение занимаемой буровыми шламами площади платформы, упрощает процесс погрузочно-разгрузочных работ, снижает затраты на транспортирование и, соответственно, значительно снижает миграцию вредных веществ в окружающую среду.



Рис. 2. Образец пробы бурового шлама ($\rho_{\text{нп}} = 1,27 \text{ г/см}^3$)



Рис. 3. Брикеты после формования и сушки ($\rho_{\text{бр.}} = 2,06 \text{ г/см}^3$)

С целью определения структуры изделия из буровых шламов месторождения Российского сектора Балтийского моря Калининградского региона был выполнен петрографический анализ (АО «НПК «Механобр-Техника» 08.06.2018) с применением испытательного оборудования и средств измерения: металлографический микроскоп для наблюдения в отраженном свете BRESSER Science MTL-201.

В результате выполненного анализа и описания установлено: «Образец изделия (брикет) из буровых шламов месторождения Российского сектора Балтийского моря Калининградского региона обладает пористой структурой, состоит из частиц глины и песка, с включениями гетита.

В результате сравнительного анализа изделия из буровых шламов с образцом бетона марки В20

установлено, что они имеют относительно схожую структуру» (Рис. 4, 5).

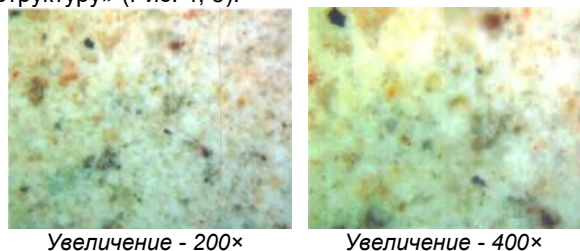


Рис. 4. Анализируемый образец изделия

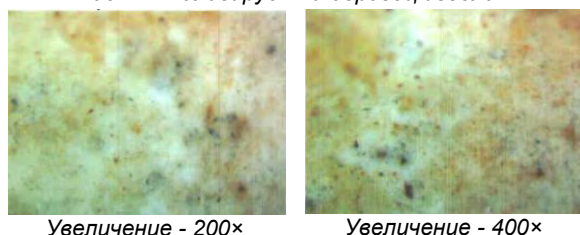


Рис. 5. Образец для сравнения. Бетон марки В20

5. Эколого-экономический эффект

Отдаленность региона от основной территории РФ, частичное или полное отсутствие элементов обустройства полигонов промышленных отходов и сложная логистическая схема порой трансграничного перемещения отходов позволяет рассматривать месторождения углеводородов российского сектора Балтийского моря Калининградского региона РФ, как объект для исследования в качестве аналога арктического месторождения.

Применение предложенного метода утилизации буровых шламов для более эффективной их утилизации в условиях, в том числе, арктических месторождений углеводородов, безусловно, должно снизить уровень негативного воздействия на окружающую природную среду, по крайней мере, за счет сокращения объемов транспортных операций.

Снижение платы за размещение отходов, получение прибыли от реализации продуктов утилизации, расширение инфраструктуры рабочих профессий предприятия, создание дополнительных рабочих мест – обеспечивают положительный экономический эффект.

В соответствии с предлагаемым концептуальным решением элементы технологической линии для подготовки к утилизации буровых шламов формировались на базе отечественного производства, с целью организации импортозамещения объектов техники и технологии нефтепромыслов.

Анализ ожидаемых результатов утилизации бурового шлама показывает, что предотвращение загрязнения среды путем сокращения площадей захоронения или вторичного использования буровых шламов является необходимым для достижения баланса между окружающей средой и человеком.

Литература

1. Нефтегазовая промышленность России как стратегический форпост государства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.neftegaz-expo.ru/>.
2. Нифонтова, Т.И. Мексиканская катастрофа. Эволюция или апокалипсис? / Т.И. Нифонтова. Труды 10-ой международной научно-практической конференции 11-13 апреля 2012 г., том 3. Воркутинский горный институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – Воркута, 2012. – С. 538-540.
3. Калашников, П.К. Стратегическое государственное планирование: освоение энергетических ресурсов арктического шельфа в контексте обеспечения безопасности Российской Федерации. П.К. Калашников, И.В. Самарин. Научное обозрение. – 2015 г. – №13. – С. 325-333.
4. Нифонтов, Ю.А. Рациональное использование отходов обогащения угля и снижение экологической напряженности при разработке месторождений Севера России: Монография. Ю.А. Нифонтов. Санкт-Петербургский горный институт, СПб, 2000, 138 с.
5. Купершмидт, М.Э. Обоснование конструктивно-технологических параметров расстирателей-гомогенизаторов для обработки силикатных смесей, автореферат кандидатской диссертации. МИСИ. М.: 1989. – 32 с.
6. Егоров Н.С. К вопросу брикетирования механически жестких углей, сборник статей: «Исследования по брикетированию углей», ИГИ, «Наука», - М., 1969, С. 14-18.
7. Шувалов, Ю.В. «К вопросу о механизме брикетирования «жестких» углей». Ю.В. Шувалов, Ю.А. Нифонтов, О.В. Ковалев, А.А. Бенин. Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. – 2004 г. № 2. С. 127-129.
8. ГОСТ 530-2012 КИРПИЧ И КАМЕНЬ КЕРАМИЧЕСКИЕ: Общие технические условия, ООО «ВНИИСТРОМ «НЦК»». Дата введения 2013-07-01.

References

1. Neftgazovaya promyshlennost' Rossii kak strategicheskij forpost gosudarstva [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.neftegaz-expo.ru/> [The oil and gas industry of Russia as a strategic outpost of the state [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.neftegaz-expo.ru/>].
2. Nifontova, T.I. Meksikanskaya katastrofa. Evolyuciya ili apokalipsis?. T.I. Nifontova. Trudy 10-oy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii 11-13 aprelya 2012 g., tom 3. Vorkutinskij gornyj institut (filial) FGBOU VPO «Nacional'nyj mineral'no-syr'evoj universitet «Gornyj». – Vorkuta, 2012. – S. 538-540 [Nifontova, T.I. Mexican disaster. Evolution or Apocalypse?. T.I. Nifontova. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, April 11-13, 2012, Volume 3. Vorkuta Mining Institute (branch) of the St. Petersburg mining university. – Vorkuta, 2012. – P. 538-540].
3. Kalashnikov, P.K. Strategicheskoe gosudarstvennoe planirovanie: osvoenie energeticheskikh resursov arkticheskogo shel'fa v kontekste obespecheniya bezopasnosti Rossijskoj Federacii. P.K. Kalashnikov, I.V. Samarin. Nauchnoe obozrenie. – 2015 g. – №13. – S. 325-333 [Kalashnikov, P.K. Strategic state planning: development of energy resources of the Arctic shelf in the context of ensuring the security of the Russian Federation. P.K. Kalashnikov, Samarin I.V. Scientific review, 2015. – № 13. – P. 325-333].
4. Nifontov, YU.A. Racional'noe ispol'zovanie othodov obogashcheniya uglya i snizhenie ekologicheskoy napryazhennosti pri razrabotke mestorozhdenij Severa Rossii: Monografiya. YU.A. Nifontov. Sankt-Peterburgskij gornyj institut, SPb, 2000, 138 s [Nifontov, Y.A. Rational use of coal enrichment waste and reduction of environmental tension in the development of deposits in the North of Russia: Monograph. Y.A. Nifontov. St. Petersburg Mining Institute, St. Petersburg, 2000. – 138 p.].
5. Kupershmidt, M.E. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov rasstiratelej-gomogenizatorov dlya obrabotki silikatnyh smesej, avtoreferat kandidatskoj dissertacii. MISI. M.: 1989. – 32 s. [Cooperschmidt, M.E. Substantiation of structural and technological parameters of homogenizer strippers for processing silicate mixtures, abstract of the dissertation. MGSU. M.: 1989. – 32 p.].
6. Egorov N.S. K voprosu briketirovaniya mekhanicheski zhestkih uglej, sbornik statej: «Issledovaniya po briketirovaniyu uglej», IGI, «Наука», - М., 1969, S. 14-18 [Egorov N.S. «On the issue of briquetting of mechanically hard coals», in the collection of articles: «Research on coal briquetting», IGI, «Science», – М., 1969, p. 14-18].
7. SHuvalov, YU.V. «K voprosu o mekhanizme briketirovaniya «zhestkih» uglej». YU.V. SHuvalov, YU.A. Nifontov, O.V. Kovalev, A.A. Benin. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten': nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – 2004 g. № 2. S. 127-129 [Shuvalov, Y.V. «On the issue of the briquetting mechanism of «hard» coals». Y.V. Shuvalov, Y.A. Nifontov, O.V. Kovalev, A.A. Benin. Mining Information and Analytical Bulletin: scientific and technical journal, 2004. – № 2, P. 127-129].
8. GOST 530-2012 KIRPICH I KAMEN' KERAMICHESKIE: Obshchie tekhnicheskie usloviya, ООО «ВНИИСТРОМ «НЦК»». Data vvedeniya 2013-07-01 [INTERSTATE STANDARD 530-2012 Ceramic brick and stone. General specifications / VNIISTROM NCC LLC. Date 2013-07-01].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Нифонтов Юрий Аркадьевич, горный инженер, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экологии промышленных зон и акваторий», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Российская Федерация, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nifontov@yandex.ru

Yuri A. Nifontov, mining engineer, professor, Dr. Sci. (Eng), head of the department of ecology of industrial zones and water areas, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nifontov@yandex.ru

Пискунова Софья Владимировна, аспирант кафедры «Экологии промышленных зон и акваторий», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Российская Федерация, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: piskunova.sv@gmail.com

Sofya V. Piskunova, graduate student of the department of ecology of industrial zones and water areas, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: piskunova.sv@gmail.com

УДК 629.12.001.2
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.048

Применение методов ионно-вакуумной модификации рабочих поверхностей твердосплавных инструментов для повышения их работоспособности

Ю.М. Зубарев¹, А.И. Круглов², М.А. Афанасенков¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. В статье описаны механизмы разрушения кромок твердосплавных инструментов под влиянием сил резания в процессе обработки заготовок и воздействия окружающей среды. Рассмотрены варианты разрушения твердосплавных инструментов при обработке без применения СОТС в зоне резания. Приведен анализ основных причин потери работоспособности инструментов из металлокерамических твердых сплавов на операциях чистового точения и растачивания. Приведен анализ многокомпонентных покрытий, в состав которых входят различные комбинации химических элементов, с точки зрения их применимости в различных условиях обработки с учетом имеющихся недостатков таких покрытий. Представлена структура многослойного покрытия, позволяющая увеличить работоспособность металлокерамических твердосплавных инструментов в процессе механической обработки заготовок. Приведены результаты комплексных теоретических и экспериментальных исследований с применением современных методов компьютерного моделирования, рентгеноструктурного анализа, оптической и просвечивающей электронной микроскопии, а так же механических испытаний.

Ключевые слова: карбид, ионная имплантация, ионно-вакуумная модификация, механическая обработка, режущий инструмент, износ режущего инструмента, многослойные покрытия, увеличение работоспособности.

Application of methods of ion-vacuum modification of working surfaces of carbide tools to improve their performance

Urii M. Zubarev¹, Andrei I. Kruglov², Mikhail A. Afanassenkov¹

¹State marine technical University of Saint-Petersburg, Russian Federation,

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation

Abstract. The article describes the mechanisms of destruction of the edges of carbide tools under the influence of cutting forces in the processing of workpieces and environmental influences. The options for the destruction of carbide tools during processing without the use of SOTS in the cutting zone are considered. The analysis of the main reasons for the loss of operability of tools made of cermet carbides in the operations of fine turning and boring is given. The analysis of multicomponent coatings, which include various combinations of chemical elements, from the point of view of their applicability in various processing conditions, taking into account the existing disadvantages of such coatings, is given. The structure of a multilayer coating is presented, which allows to increase the performance of cermet carbide tools in the process of machining workpieces. The results of complex theoretical and experimental studies using modern methods of computer simulation, X-ray diffraction analysis, optical and transmission electron microscopy, as well as mechanical tests are presented.

Key words: carbide, ion implantation, ion-vacuum modification, machining, cutting tool, wear of the cutting tool, multilayer coatings, increased working capacity.

Введение

Современные тенденции развития машиностроительных предприятий выдвигают на первый план задачи по созданию экономически эффективного производства. В рамках этой задачи существует ряд проблем, важность которых в научном и техническом плане, несмотря на постоянные попытки найти решение этих вопросов, продолжают оставаться актуальными. В настоящее время проблема прочности, износостойкости и надежности машин и механизмов входит в первую пятерку приоритетов современного научно-технического прогресса. Таким образом, при решении задачи улучшения эксплуатационных характеристик деталей машин, большое значение отводится применению технологий упрочнения поверхности конструкционных материалов. Это положение относится и к инструментальными материалам.

Большинство материалов, в особенности инструментальных, имеют ограничения по допускаемым температурам нагрева в твердом состоянии, после достижения которых

эксплуатационные характеристики материалов снижаются. Этот факт является очень важным при выборе способа модификации инструментов, так как все известные методы ионно-вакуумной обработки в большей или меньшей степени приводят к нагреву обрабатываемых материалов. Кроме того, некоторые из процессов при своей реализации приводят к достаточно высоким температурам нагрева рабочих поверхностей инструментов во время ионной обработки.

Для выбора рациональных областей применения способов ионно-вакуумной модификации с одной стороны, требуется знать теплофизические характеристики инструментальных материалов (теплостойкость, теплопроводность, теплоемкость, способность длительное время выдерживать высокие температуры и др.), с другой стороны - технологические параметры способов ионных воздействий. И если для ионно-плазменного покрытия и ионной имплантации отдельных материалов существуют известные формулы по расчету температуры нагрева, то о применимости различных способов нанесения покрытий в процессе обработки всей гаммы основных инструментальных

материалов, имеющиеся данные достаточно противоречивы [1, 2].

Особые параметры, связанные с работой инструментов в условиях прерывистого резания, во многих случаях снижают эффективность традиционных износостойких покрытий, добавляя дополнительные требования к ним, связанные с необходимостью повышения адгезии покрытия к основе, а также улучшения когезионных связей элементов покрытия и уменьшения количества дефектов в них. Все это приводит к повышению требований и для трещиностойкости формируемых покрытий.

Одним из вариантов решения этой задачи является формирование многослойных покрытий с повышенными адгезионными связями между слоями покрытия и инструментальной основой. Причины снижения работоспособности твердосплавного инструмента [3, 4].

1. Причины потери работоспособности инструментов

Анализ основных причин потери работоспособности инструментов из металлокерамических твердых сплавов на операциях чистового точения и растачивания позволяет сделать следующие выводы.

Одной из основных причин выхода пластин из строя являются высокие тепловые нагрузки, действующие на площадках контакта обрабатываемого материала с режущим лезвием по передним и задним поверхностям режущего клина. Учитывая относительно малые сечения среза при чистовой обработке, отвод тепла в инструментальный материал приводит к значительному повышению температуры нагрева режущего лезвия непосредственно у вершины резца, что, в свою очередь, способствует интенсификации размерного износа инструмента. В некоторых случаях температуры нагрева могут превысить допустимые по значениям теплостойкости инструментального материала, а это приводит к потере инструментами своих режущих свойств.

Другой важной причиной потери инструментом работоспособности является наличие у него дефектного поверхностного трещиноватого слоя, образующегося как в процессе изготовления металлокерамических твердосплавных пластин, наблюдаемые в основном у инструментальных пластин, полученных методом спекания при больших давлениях и температурах, так и при их заточке. Поверхностные микротрещины, часто выходящие наружу на рабочие поверхности инструментов, являются одной из причин образования магистральных разрушающих режущих клин трещин в процессе резания. Кроме того, наличие поверхностных дефектов часто приводит к приповерхностному разрушению металлокерамических твердых сплавов в виде образования участков вырыва инструментального материала, что, резко интенсифицируя износ, приводит к изменению геометрии режущего лезвия, и, как следствие, к преждевременному выходу инструмента из строя.

Немаловажным фактором, влияющим на работоспособность инструментов, является микропрофиль поверхности, формируемый при их

изготовлении. Достаточно часто оценка параметров микрогеометрии сводится только к измерению значений Rz и Ra, однако, при изучении механизма контактного взаимодействия при резании большое значение имеют и другие параметры микропрофиля, как размерные, так и безразмерные.

При изучении механизмов разрушения инструментов, также необходимо учитывать диффузионные процессы, происходящие при резании, как в самих инструментальных материалах, так и при их контактом взаимодействии с обрабатываемым материалом и окружающей средой. Данный фактор редко оценивается при разработке мероприятий по повышению работоспособности инструментов, однако важность его может быть значительна. Анализ физико-химических процессов, происходящих в поверхностных слоях твердосплавных металлокерамических инструментов в процессе их эксплуатации, позволил установить негативное воздействие на них силовых и тепловых факторов, в результате которых происходит диффузия углерода из инструментального материала в пограничную область, где в контакте с обрабатываемым материалом образуются карбиды, ослабляющие приграничные подповерхностные слои. В этих слоях также возникают дефекты в виде пор, что приводит к адгезионно-усталостному разрушению инструментального материала. Кроме того, углерод разрушает окисную пленку на поверхности твердого сплава, предохраняющую карбиды от дальнейшего окисления. Разрушение окисной пленки, обладающей низким коэффициентом трения, активизирует адгезионно-диффузионные процессы в контактной зоне [4,5].

Кроме того, в процессе эксплуатации инструмента происходит диффузия кислорода из окружающей среды по межкристаллитным границам. Диффузия O_2 внутрь вызывает окисление твердого сплава, в результате чего ослабляются связи между зёрнами карбидов, и происходит окисление самих карбидов. Все это интенсифицирует процесс износа инструмента. Кроме того, при обработке стали, наблюдается диффузия железа из обрабатываемого материала в твердый сплав по кобальтовой связке. В результате диффузии происходит ослабление сил, удерживающих карбиды WC, TiC, TaC в связке, что также приводит к ускорению износа. Железо вступает в соединение с компонентами твердого сплава и с кислородом, образуя при этом интерметаллиды, окислы и карбиды типа $COFe_3$, $COFe_3O_4$, Fe_3W_3C , Fe_3C . Все это приводит к разупрочнению приповерхностных слоев инструментального материала. В ряде случаев наблюдается диффузия CO из твердого сплава в стружку [4].

Подводя итоги представленного анализа, следует отметить, что под потерей инструментами работоспособности понимается как разрушение самого режущего лезвия, так и получение низких характеристик требуемой точности и качества обработанной поверхности, что недопустимо для чистовых операций. Таким образом, одним из путей повышения работоспособности является уменьшение значений величин режимов резания, что приводит и к снижению производительности обработки. Другим же путем решения поставленной задачи, способным, в т.ч. и обеспечить повышение

производительности процесса резания, является модификация рабочих поверхностей инструментов.

2. Создание многослойных структур поверхностных покрытий.

Под модификацией понимается направленное улучшение эксплуатационных свойств инструментов за счет создания многослойных структур поверхностных покрытий, каждое из которых обладает своей функциональной направленностью. В качестве технологических методов для реализации предложенных структур мы предлагаем использовать различные способы ионно-вакуумной обработки [3,4,5].

Одной из основных задач модификации твердосплавных инструментов, используемых на операциях чистовой обработки, является «разгрузка» режущей кромки инструмента в тепловом отношении за счет более интенсивного отвода тепла из зоны резания. Для этого рекомендуется сформировать теплопроводный слой в составе покрытия. Также, этот слой должен обладать хорошей сопротивляемостью к приведенным выше видам износа твердых сплавов. Одновременно следует обеспечить и барьерные функции внешнего слоя, необходимые для защиты от «вредных» диффузий из окружающей среды и обрабатываемого материала при резании.

Для обеспечения необходимых требований, нами предлагается следующий состав слоя покрытия – Cu-Mo-Ti. Выбор данного состава объясняется рядом факторов [4]:

1) данные элементы способны образовывать соединения с высокой теплопроводностью: Cu_2Ti , Mo_2Ti , Cr_2Ti ;

2) кроме образования данными элементами фаз Лавеса [6], возможно образование твердых растворов в системах (Ti – Mo) и (Cu – Mo), а также достаточно устойчивых псевдосплавов (W – Cu).

Таким образом, в предложенном составе слоя медь можно рассматривать как теплопроводный материал, а молибден и титан – как элементы, обеспечивающие повышение прочности с ОЦК – решеткой, которые позволяют повысить прочность композиции на основе меди за счет образования фаз Лавеса, твердых растворов и псевдосплавов.

Технологически данную структуру и состав поверхностного слоя можно обеспечить применением секторного магнетрона, работающего в атмосфере азота на завершающей стадии нанесения покрытия [4, 5].

Таким образом, для повышения работоспособности металллокерамических твердосплавных инструментов, предназначенных для выполнения чистовых операций механической обработки, рекомендуется, после распыления дефектного трещиноватого слоя, сформировать модифицированный поверхностный слой следующего состава: Cr-(Cu-Mo-Ti)-N.

3. Экспериментальные данные

В лаборатории нанотехнологий были выполнены комплексные теоретические и экспериментальные исследования с применением современных методов компьютерного моделирования, рентгеноструктурного анализа, оптической и просвечивающей электронной микроскопии,

механических испытаний и др., в производственных условиях, а также в технологической лаборатории ФГАОУ ВПО СПбПУ был протестирован режущий инструмент с различными покрытиями его режущей части, нанесенными методами ИВМ (см. рис. 1...6).

Как показали испытания в лабораторных условиях, предлагаемый состав покрытия Cr-(Cu-Mo-Ti)-N успешно работает при обработке большинства сталей, показывая увеличение стойкости металлорежущего инструмента в 2...3 раза.

Проведенные испытания в реальном производстве, при обработке заготовок деталей энергетического оборудования, подтвердили результаты теоретических и лабораторных исследований.

Заключение

В результате проведенных экспериментов доказано, что применение ионно-вакуумной модификации для нанесения покрытий на режущую часть твердосплавных инструментов, значительно повышает их работоспособность.

Доказана экономическая эффективность предложенного метода. Несмотря на то, что нанесение покрытий требует дополнительных затрат на установку и технологию создания покрытий, они повышают износостойкость металллокерамических твердых сплавов, что приводит к снижению в их потребности, кратной повышению стойкости инструмента. Кроме того, повышается точность и качество обработанных поверхностей.

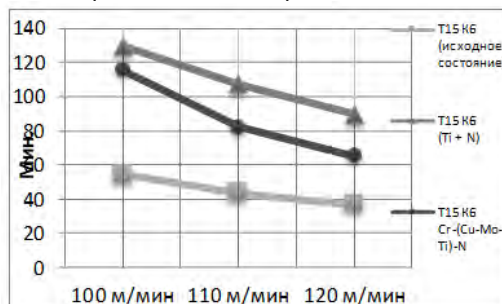


Рис. 1. Изменение стойкости (мин) пластин при растачивании отверстий стали 45Г диаметром 219,13 Н10 мм на длине 172 мм при различных скоростях резания твердосплавными пластинами T15K6, T15K6 с покрытием TiN, T15K6 с покрытием Cr-(Cu-Mo-Ti)-N

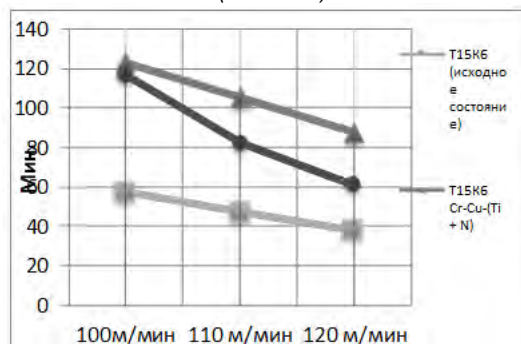


Рис. 2. Изменение стойкости пластин (мин) при растачивании отверстий стали 45Г диаметром 170,43 Н10 мм на длине 148 мм при различных скоростях резания твердосплавными пластинами T15K6, T15K6 с покрытием TiN, T15K6 с покрытием Cr-(Cu-Mo-Ti)-N

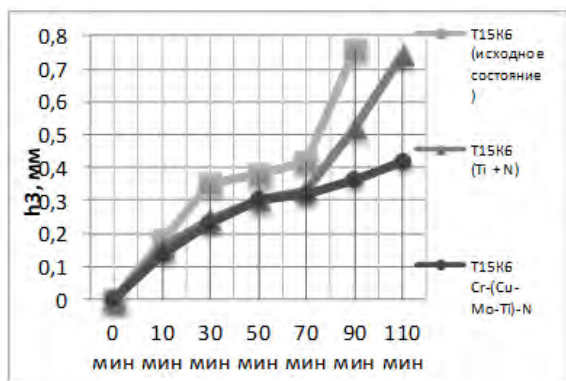


Рис. 3. Результаты стойкостных испытаний резов, при точении стали 45 твердосплавными пластинами T15K6, T15K6 с покрытием TiN, T15K6 с покрытием Cr-(Cu-Mo-Ti)-N. Режимы: $t=1,5$ мм, $S=10$ мм/мин, $V=140$ м/мин

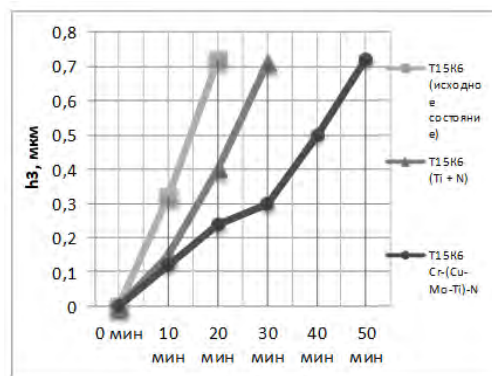


Рис. 5. Результаты стойкостных испытаний резов, при точении стали 10X18H9T твердосплавными пластинами T15K6, T15K6 с покрытием TiN, T15K6 с покрытием Cr-(Cu-Mo-Ti)-N. Режимы: $t=1,5$ мм, $S=10$ мм/мин, $V=140$ м/мин

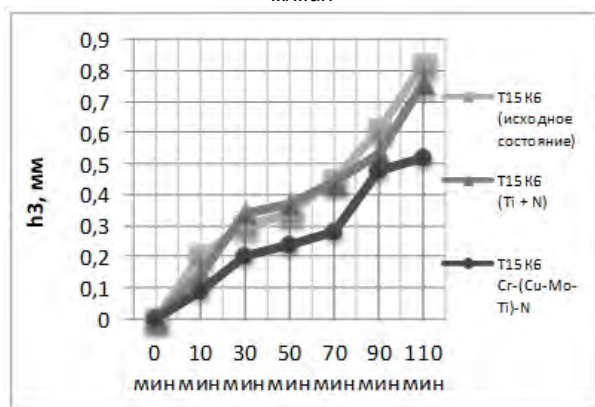


Рис. 4. Результаты стойкостных испытаний резов, при точении стали 12X13 твердосплавными пластинами T15K6, T15K6 с покрытием TiN, T15K6 с покрытием Cr-(Cu-Mo-Ti)-N. Режимы: $t=1,5$ мм, $S=10$ мм/мин, $V=140$ м/мин

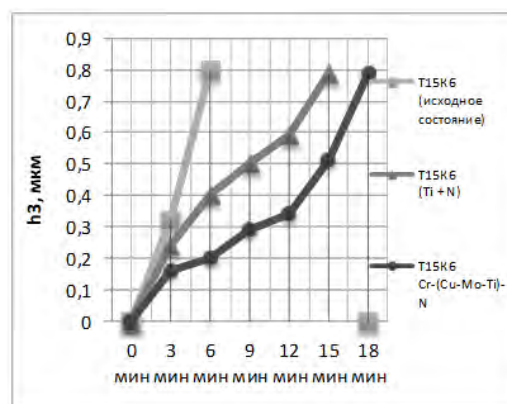


Рис. 6. Результаты стойкостных испытаний резов, при точении стали 12X13 твердосплавными пластинами VK8, VK8 с покрытием TiN, VK8 с покрытием Cr-(Cu-Mo-Ti)-N. Режимы: $t=2,5$ мм, $S=20$ мм/мин, $V=100$ м/мин

Литература

1. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. – М.: Изд-во Машиностроение, 2011. – 368 с.
2. Зубарев Ю.М. Современные инструментальные материалы. - С-Пб.: Изд-во Лань, 2014. – 304с.
3. Зубарев Ю.М., Круглов А.И., Афанасенков М.А. Метод выбора элементов для модификации рабочих поверхностей инструментов ионно-вакуумной обработкой с применением конфигурационной модели вещества. – ж. «Металлообработка» №3 (111)/2019, с.49-53.
4. Зубарев Ю.М., Афанасенков М.А. Повышение износостойкости металлорежущего инструмента, путем нанесения функциональных покрытий на его режущую часть. ж. «Морские интеллектуальные технологии» №4 Т.1/2019, с.91 – 96.
5. Сенчило И.А. и др. Технология обработки с использованием потоков высокоэнергетических частиц. – С.-Пб.: ПИМаш, 2004. – 116 с.
6. Лавес Ф. Факторы, определяющие кристаллическую структуру. // Интерметаллические соединения. – М.: Металлургия, 1970.

References

1. Grigor'yev S.N. Metody povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta [Methods for increasing the durability of cutting tools]. M.: Izd-vo Mashinostroyeniye, 2011. 368 s.
2. Zubarev YU.M. Sovremennyye instrumental'nyye materialy [Modern instrumental materials]. SPb.: Izd-vo Lan', 2014. 304s.
3. Zubarev YU.M., Kruglov A.I., Afanasenkov M.A. Metod vybora elementov dlya modifikatsii rabochikh poverkhnostey instrumentov ionno-vakuumnoy obrabotkoy s primeneniyyem konfiguratsionnoy modeli veshchestva [Method of selecting elements for modifying the working surfaces of tools by ion-vacuum treatment using a configuration model of the substance]. zh. «Metall obrabotka» №3 (111)2019, s.49. 53.
4. Zubarev YU.M., Afanasenkov M.A. Povysheniye iznosostoykosti metallorezhushchego instrumenta, putem naneseniya funktsional'nykh pokrytiy na yego rezhushchuyu chast' [Increasing the wear resistance of a metal-

- cutting tool by applying functional coatings to its cutting part]. zh. «Morskiye intellektual'nyye tekhnologii» №4 Т.1 2019, s.91-96.
5. Senchilo I.A. i dr. Tekhnologiya obrabotki s ispol'zovaniyem potokov vysokoenergeticheskikh chastits [Processing technology using high-energy particle flows]. S. Pb.: PIMash, 2004. 116 s.
 6. Laves F. Faktory, opredelyayushchiye kristallicheskiyu strukturu. Intermetallicheskiye soyedineniya [Factors that determine the crystal structure]. M.: Metallurgiya, 1970.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Михайлович Зубарев, доктор технических наук, профессор кафедры технологии судового машиностроения Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: iuzubarev@mail.ru

Urii M. Zubarev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of marine engineering technology Department, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: iuzubarev@mail.ru

Андрей Игоревич Круглов, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: andoscar@yandex.ru

Andrei I. Kruglov, Ph.D. (Eng), assistant professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnic str., 29, St. Petersburg 195251, Russian Federation, e-mail: andoscar@yandex.ru

Михаил Алексеевич Афанасенков, аспирант кафедры технологии судового машиностроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: afanasenkov.mi@yandex.ru

Mikhail A. Afanasenkov, graduate student of the Department of marine engineering technology, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: afanasenkov.mi@yandex.ru

УДК 620.193.81

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.049

Исследование влияния гидрокориичной (3-фенилпропановой) кислоты на процесс микробиологической коррозии стали

А.А. Грибанькова^{1,2}, М.А. Агиевич², О.А. Евтуховская², В.В. Гурченко², С. Чжай^{3,4}, Ц. Дуань^{3,4}, Б. Хоу^{3,4}

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ³Китайская академия наук, ⁴Пилотная национальная лаборатория по морской науке и технике (Циндао)

Аннотация. В основе работы лежит исследование воздействия органического соединения (ОС) – гидрокориичной (3-фенилпропановой) кислоты на бактериальные клетки СРБ (сульфатредуцирующих бактерий) являющиеся стимуляторами коррозионных процессов. Подбор условий использования и количественная оценка эффективности ингибирующего (биоцидного) действия исследуемого ОС, которое может быть применено для защиты стали от коррозии в средах, содержащих сульфатредуцирующие бактерии. В ходе исследования было изучено влияние ОС на развитие сульфатредуцирующих бактерий и определены такие параметры, как изменение значения pH и окислительно-восстановительного потенциала образцов в среде, численности бактерий и содержания биогенного сероводорода в зависимости от концентрации используемого ОС. Сделаны основные выводы о ингибирующем коррозию и биоцидном действиях испытуемого органического соединения путем оценки скорости коррозии образцов стали и защитном эффекте в зависимости от выбранных концентраций органического соединения методом гравиметрии. Дополнительная оценка ингибирующего действия была проведена методом электрохимической импедансной спектроскопии и методом снятия поляризационных кривых испытуемых образцов.

Ключевые слова: защита от коррозии, биоциды, ингибиторы коррозии, сульфатредуцирующие бактерии, сероводородная коррозия.

Investigation of the effect of hydrocinnamic (3-phenylpropanoic) acid on the microbiological corrosion of steel

Anzhela A. Gribankova^{1,2}, Maria A. Agievich², Olesya A. Evtukhovskaya², Valentin V. Gurchenko², Xiaofan Zhai^{3,4}, Jizhou Duan^{3,4}, Baorong Hou^{3,4}

¹St. Petersburg State Marine Technical University, ²Immanuel Kant Baltic Federal University, ³Chinese Academy of Sciences, ⁴Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao)

Abstract. The study is based on the study of the effect of an organic compound (OC) – hydrocinnamic (3-phenylpropanoic) acid on the bacterial cells of SRB (sulfate-reducing bacteria), which are stimulants of corrosion processes. Selection of conditions of use and a quantitative assessment of the effectiveness of the inhibitory (biocidal) action of the studied OC, which can be used to protect steel from corrosion in environments containing SRB. In the course of the study, the effect of OC on the development of SRB was studied and such parameters as the change in the pH value and the redox potential of the samples in the medium, the number of bacteria and the content of biogenic hydrogen sulfide depending on the concentration of the used OC were determined. The main conclusions are drawn about the inhibitory corrosion and biocidal actions of the test OC by assessing the corrosion rate of steel samples and the protective effect depending on the selected concentrations of the OC by gravimetry. An additional assessment of the inhibitory effect was carried out by the method of electrochemical impedance spectroscopy and by the method of taking the polarization curves of the test samples.

Key words: corrosion protection, biocides, corrosion inhibitors, sulfate-reducing bacteria, hydrogen sulfide corrosion.

Введение

Важным фактором, влияющим на надежность и долговечность конструкций и сооружений из металлов и сплавов, особенно в зонах с повышенной влажностью, является коррозия. Микробно-индуцированная коррозия (МИК) железа и сталей в присутствии сульфатредуцирующих бактерий (СРБ), согласно нашим представлениям, может рассматриваться как сложный многостадийный электрохимический процесс, инициируемый и катализируемый бактериями. Быстрое размножение и способность легко приспосабливаться к изменениям физических, химических и биологических факторов среды – основная опасность бактериальной коррозии. Одним из наиболее эффективных и длительно действующих способов защиты конструкций от коррозионных поражений микроорганизмами является применение биоцидных препаратов. [1]

Гидрокориичная кислота относится к ряду фенольных соединений и известна своим многосторонним действием на организм человека, а также является важным компонентом, используемым в медицине для получения ряда лекарственных препаратов. Как большинство фенольных соединений, она обладает антиоксидантным механизмом действия, который, однако, еще не до конца изучен [2–4]. Активное участие ряда веществ, к которым относится гидрокориичная (3-фенилпропановая) кислота, в окислительно-восстановительных процессах, обеспечивающих энергетические потребности микроорганизмов, необходимых для их жизнедеятельности, вызывает интерес к исследованию ее воздействия на бактериальные клетки [5–7].

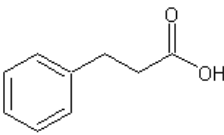
1. Методика эксперимента

В коррозионных испытаниях использованы образцы стали марки Ст3 известной массы,

наибольшими средними размерами 16 x 50 мм, предварительно подготовленные согласно ГОСТ 9.912-89. Для обнаружения СРБ и поддержания культуры с целью сохранения жизнеспособности клеток, а также таксономических свойств бактерий, использовали среду Постгейта Б (хлорид натрия по ГОСТ 4233-77 – 7,5 г; сульфат магния по ГОСТ 4523-77 – 1,0 г; карбонат натрия по ГОСТ 83-79 – 1,0; сульфат натрия по ГОСТ 21458-75 – 2,0 г; дигидрофосфат натрия по ГОСТ 245-76 – 0,5 г; лактат кальция по ГОСТ 31905-2012 – 2,0 г; дистиллированная вода по ГОСТ 6709-72 – 1 л). После приготовления и стерилизации основной раствор питательной среды обескислороживали. Культуру СРБ получали путем многократного пересева на питательную среду бактерий, взятых из оборотной воды (умягченная в равных долях умягченной и сырой артезианской водой) и заоложенной воды (с подпиткой деминерализованной водой). В качестве ингибитора микробиологической коррозии была использована гидрокориичная кислота – органическое соединение (ОС) ряда фенольных соединений (табл. 1).

Таблица 1

Химическая формула ОС

Название	Брутто-формула	Структурная формула
Гидрокориичная кислота (3-фенилпропановая)	C ₉ H ₁₀ O ₂	

В предварительно простерилизованные пробирки помещали плоские образцы стали, предварительно подготовленные согласно ГОСТ 9.912-89.

Длительность коррозионных испытаний составила 168 часов. В пробирки, за исключением трех контрольных, содержащие питательную среду и образцы воды было добавлено исследуемое ОС в количествах, необходимых для получения концентраций 10 ммоль/л и 20 ммоль/л. В процессе испытаний в коррозионной среде анализировали величину pH, окислительно-восстановительный потенциал среды, электродный потенциал исследуемых образцов пластин, концентрацию биогенного сероводорода, активность бактериальных клеток, сопротивление переноса заряда и ток коррозии. Концентрацию биогенного сероводорода определяли методом прямого йодометрического титрования. Проведены наблюдения за ингибирующей способностью ОС с одновременной оценкой их бактерицидного действия.

Учёт численности сульфатредуцирующих бактерий вели методом прямого подсчета в объеме камеры Горяева в поле зрения микроскопа Carl Zeiss Axio Lab.A1 в режиме 400-кратного увеличения.

Скорость коррозии определяли по убыли массы образцов гравиметрическим методом:

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot t}, \tag{1}$$

где K – скорость коррозии в мкг·см⁻²·сут⁻¹, Δm – разность масс образцов в мкг, S – средняя площадь поверхности образца в м², t – время экспозиции равное 7 сут.

Степень защиты определяли по формуле:

$$Z = \frac{\Delta K}{K} \cdot 100\%, \tag{2}$$

где Z – защитный эффект в %, ΔK – разность скоростей коррозии в присутствии ингибитора и контрольного образца, K – скорость коррозии контрольного образца.

Сопrotивление переноса заряда и ток коррозии определены при помощи потенциостата Р-45Х, подключённого по трехэлектродной схеме к электрохимическим ячейкам с питательной средой Постгейта Б, инокулированной накопительной культурой СРБ. В питательную среду было введено исследуемое вещество в концентрации 15 ммоль·л⁻¹. В качестве рабочего электрода использован заизолированный стальной образец с площадью рабочей поверхности 1 см², вспомогательного – платиновый электрод, электрода сравнения – стандартный хлорсеребрянный электрод. Измерения проводились каждый день в течение 7 суток.

2. Результаты и их обсуждение

Коррозионные испытания образцов стали в пробах содержащих ОС в концентрациях 10 ммоль/л и 20 ммоль/л показали, что в течение 168 часов происходит изменение pH среды, являющееся, как правило, следствием жизнедеятельности микроорганизмов. Оно вызывает существенные изменения скорости коррозии и других электрохимических характеристик.

Из анализа диаграммы (рис. 1) видно, что в пробах, содержащих образец заоложенной воды на всей протяженности экспозиции наблюдалось равномерное смещение значений pH среды в сторону слабощелочных, с характерным выравниванием линии с 5–7 сутки. Это объясняется наличием в составе образца деминерализованной воды.

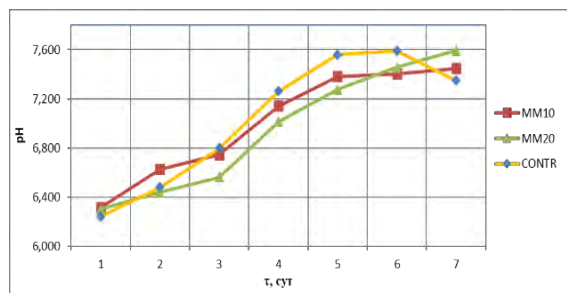


Рис. 1. Зависимость изменения pH среды от времени коррозионных испытаний под воздействием органической добавки (образец заоложенной воды)

Из анализа диаграммы (рис. 2) видно, что в пробах, содержащих образец оборотной воды на всей протяженности экспозиции наблюдалось равномерное смещение значений pH среды в сторону щелочных значений среды. Ввиду того, что в состав образца входит сырая артезианская вода, введение добавки гидрокориичной (3-

фенилпропановой) кислоты в значительной степени снижает численность сульфатредуцирующих бактерий и концентрацию биогенного сероводорода.

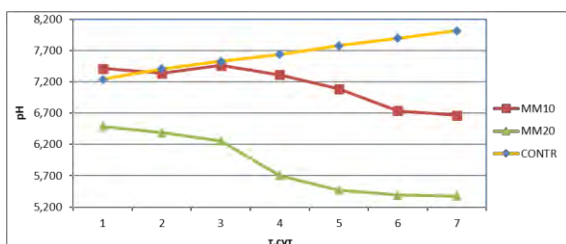


Рис. 2. Зависимость изменения pH среды от времени коррозионных испытаний под воздействием органической добавки (образец оборотной воды)

В ходе исследования действия гидрокоричной (3-фенилпропановой) кислоты на образцы воды, экспериментально определена ее эффективная концентрация. В испытуемых образцах с содержанием ОС равным 20 ммоль/л наблюдался сдвиг значений pH среды в область слабощелочных и щелочных значений соответственно, обусловленный уменьшением содержания сульфат-ионов в питательной среде.

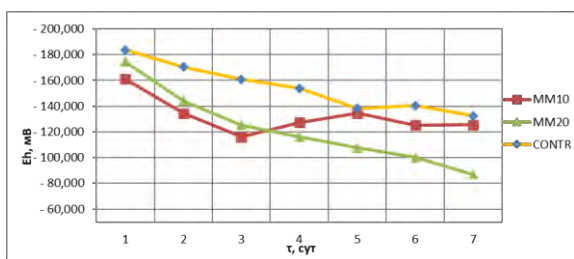


Рис. 3. Влияние ОС на окислительно-восстановительный потенциал среды, инокулированной клетками СРБ

Изменение окислительно-восстановительного потенциала среды напрямую зависит от содержания в ней биогенного сероводорода. На графике, представленном на рисунке 3 можно проследить динамику изменения значений окислительно-восстановительного потенциала в зависимости от выбранного значения концентрации ОС по сравнению с контрольной пробой. Характерное смещение в область положительных значений свидетельствует о снижении продуцирования сероводорода по сравнению с контрольной серией.

Визуальное исследование поверхностей образцов стали на всем протяжении процесса экспозиции показало так же отсутствие большого количества продуктов метаболизма, образующегося в виде осадка и характерного почернения водной среды, обусловленное образованием сульфидов, с сохранением характерного для металла блеска, что указывает на высокую степень защитного эффекта. Данные визуального наблюдения хорошо согласуются с полученными значениями скоростей коррозии и защитного эффекта. Наибольший защитный эффект наблюдается в концентрации ОС равной 20 ммоль/л (табл. 2).

Таблица 2

Изменение массы образцов в ходе экспозиции

C(ОС), ммоль·л ⁻¹	m ₀ , г	m ₁ , г	Δm, г	K, г·м ² ·сут	Z, %
10 (зах.)	6,4440	6,4453	0,0013	0,0097	69,7
10 (об.)	6,4850	6,4826	0,0024	0,0180	38,2
20 (зах.)	6,4804	6,4794	0,0010	0,0074	74,3
20 (об.)	6,4905	6,4876	0,0029	0,0216	25,3
контроль	6,4801	6,4761	0,0040	0,0300	—

Процесс катодной деполяризации железа под действием сульфатредуцирующих бактерий можно исследовать экспериментально методом снятия поляризационных кривых, характер которых позволяет судить об интенсивности коррозионного процесса, обусловленного жизнедеятельностью бактерий.

По данным сопротивления переносу заряда (R_{пз}) из таблицы 3 видно, что с течением времени происходит рост значений. В первые трое суток R_{пз} выше в среде с ингибитором, что свидетельствует об ингибирующем действии, но впоследствии становится ниже относительно контрольной пробы. Это объясняется образованием на поверхности стального образца в контрольной ячейке сульфидной плёнки, обладающей экранирующим действием, в ячейке с ингибитором её образование не наблюдается. Обнаружено снижение величины тока коррозии (I_{корр}) относительно контрольной ячейки, что свидетельствует об ингибирующем действии.

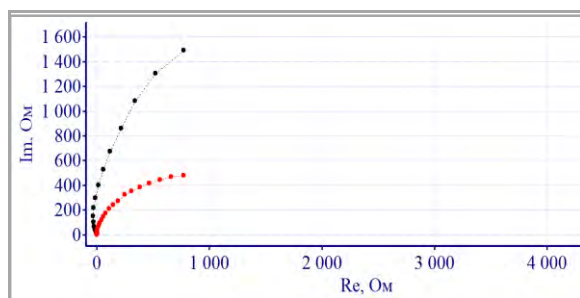


Рис. 4. Диаграммы Найквиста на 7 сутки (чёрная кривая – контроль, красная – с добавлением ОС)

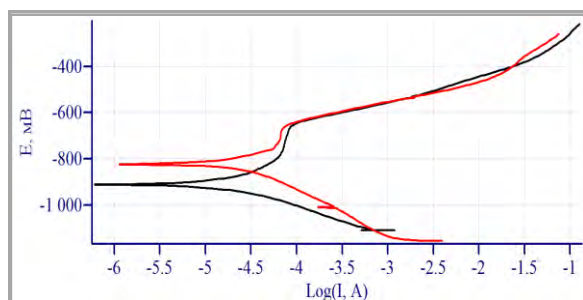


Рис. 5. Поляризационные кривые на 7 сутки (чёрная кривая – контроль, красная – с добавлением ОС)

Таблица 3
Сопrotивление переносу заряда и ток коррозии

сутки	R _{пз} , КОм·см ²						I _{кор} , мкА·см ²	
	1	2	3	4	5	6		
контр.	0,91	0,93	0,97	2,13	2,43	3,42	3,87	55
C(OC) 20ММ	0,99	1,36	1,41	1,42	1,41	1,42	1,42	43
ЭИ, %	8,4	31,3	31,1	–				21,8

Основные выводы

1. Исследованное ОС обладает ингибирующим (биоцидным) действием, а также при больших концентрациях снижает скорость общей коррозии.
2. Установленная зависимость скорости коррозии и защитного эффекта от выбранных концентраций свидетельствует о том, что наилучшее влияние при концентрации 20 ммоль/л защитный эффект достигает максимальных значений: 74 % (для образца заоложенной воды) и 25% (для образца оборотной воды) соответственно.
3. Введение исследованного соединения приводит к увеличению R_{пз} и снижению I_{кор}, что свидетельствует о его ингибирующем действии;
4. Эффективность ингибирования электрохимической коррозии составила 21,8 %.

Дополнительная информация

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-53-53034 ГФЕН «Фундаментальное исследование передовых зеленых противообрастающих и коррозионностойких в морской среде композиционных металлических покрытий и технологий».

Литература

1. К решению вопроса о создании строительных композиционных материалов с высокой активной защитой от микробиологического воздействия / Токач Ю. Е., Рубанов Ю. К., Василенко М. И., Гончарова Е. Н. / Вестник Белгородского гос. технолог. унив. им В. Г. Шухова. – С. 2–58.
2. Белоглазов С.М. Электрохимический водород и металлы. Поведение и борьба с охрупчиванием. Калининград: КГУ, 2004. – 324 с.
3. Коррозия сталей под воздействием микроорганизмов / С. Ю. Нижегородов, С. А. Волосков, В. А. Трусов, Л. М. Капуткина, Т. А. Сюр // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. - № 4. – С. 44–48.
4. Ru Jia, Tuba Unsal, Dake Xu, Yassir Lekbach, Tingyue Gu. Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2019. – V. 137. – P. 42-58.
5. Suarez, E., Machuca, L., Lepkova, K. The role of bacteria in under-deposit corrosion in oil and gas facilities: A review of mechanisms, test methods and corrosion inhibition // Corrosion & Materials. – 2019. – 44 (1). – P. 80-87.
6. Korneev S. M. Hydrocinnamic acids. Application and strategy of synthesis. Synthesis, 2013, V. 45, № 8, P. 1000–1015.
7. Кабалов Е. Н. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии / Е. Н. Кабалов, О. В. Старцев, И. М. Медведев // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 2. – С. 76–87.

References

1. K resheniyu voprosa o sozdanii stroitel'nykh kompozitsionnykh materialov s vysokoy aktivnoy zashchitoy ot mikrobiologicheskogo vozdeystviya [To solving the issue of creating building composite materials with high active protection against microbiological effects] / Tokach YU. E., Rubanov YU. K., Vasilenko M. I., Goncharova E. N. / Vestnik Belgorodskogo gos. tekhnolog. univ. im V. G. SHuhova. – P. 2–58.
2. Beloglazov S. M. Elektrokhimicheskiy vodorod i metally. Povedenie i bor'ba s okhrupchivaniem [Electrochemical hydrogen and metals. Behavior and the fight against embrittlement]. Kaliningrad: KGU, 2004. – 324 p.
3. Korroziya staley pod vozdeystviem mikroorganizmov [Corrosion of steels under the influence of microorganisms] / S. YU. Nizhegorodov, S. A. Voloskov, V. A. Trusov, L. M. Kaputkina, T. A. Syur // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 2008. - № 4. – P. 44–48.
4. Ru Jia, Tuba Unsal, Dake Xu, Yassir Lekbach, Tingyue Gu. Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2019. – V. 137. – P. 42-58.
5. Suarez, E., Machuca, L., Lepkova, K. The role of bacteria in under-deposit corrosion in oil and gas facilities: A review of mechanisms, test methods and corrosion inhibition // Corrosion & Materials. – 2019. – 44 (1). – P. 80-87.
6. Korneev S. M. Hydrocinnamic acids. Application and strategy of synthesis. Synthesis. – 2013. - V. 45 (8). - P. 1000–1015.
7. Kabalov E. N. Obzor zarubezhnogo opyta issledovaniy korrozii i sredstv zashchity ot korrozii [Overview of foreign experience in corrosion research and corrosion protection] / E. N. Kabalov, O. V. Startsev, I. M. Medvedev // Aviatsionnye materialy i tekhnologii. – 2015. – № 2. – P. 76–87.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анжела Алексеевна Грибанькова, доктор педагогических наук, кандидат химических наук, доцент, профессор кафедры химии факультета естественнонаучного и гуманитарного образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: Gribankova@smtu.ru

Мария Алексеевна Агиевич, кандидат химических наук, доцент с учёной степенью кандидат наук института живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: agievichmaria@mail.ru

Олеся Александровна Евтуховская, аспирант института живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: olesya.evtuhovsk@mail.ru

Валентин Викторович Гурченко, аспирант института живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: benzvalen@gmail.com

Сяофан Чжай, кандидат химических наук, доцент, основная лаборатория морской коррозии и биообрастания CAS, институт океанологии, Китайская академия наук, 266071 Циндао, КНР; открытая студия по защите от коррозии и защиты морской среды, пилотная национальная лаборатория по морской науке и технике (Циндао), 266235 Циндао, КНР; центр мега науки океана, Китайская академия наук, Циндао, КНР, e-mail: zxf_8968@163.com

Цзичжоу Дуань, профессор, основная лаборатория морской коррозии и биообрастания CAS, институт океанологии, Китайская академия наук, 266071 Циндао, КНР; открытая студия по защите от коррозии и защиты морской среды, пилотная национальная лаборатория по морской науке и технике (Циндао), 266235 Циндао, КНР; центр мега науки океана, Китайская академия наук, Циндао, КНР, e-mail: duanjz@ms.qdio.ac.cn

Баоронг Хоу, академик, основная лаборатория морской коррозии и биообрастания CAS, институт океанологии, Китайская академия наук, 266071 Циндао, КНР; открытая студия по защите от коррозии и защиты морской среды, пилотная национальная лаборатория по морской науке и технике (Циндао), 266235 Циндао, КНР; центр мега науки океана, Китайская академия наук, Циндао, КНР, e-mail: houbr@qdio.ac.cn

Anzhela A. Gribankova, Dr. Sci. (Edu), Ph. D. (Chem), Assistant Professor, Professor of Department of Chemistry, Faculty of Science and Humanities, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: Gribankova@smtu.ru

Maria A. Agievich, Ph. D. (Chem), Assistant Professor of School of Life Science, Immanuel Kant Baltic Federal University, A. Nevskogo, 14, Kaliningrad 236016, Russian Federation, e-mail: agievichmaria@mail.ru

Olesya A. Evtukhovskaya, Graduate Student of School of Life Science, Immanuel Kant Baltic Federal University, A. Nevskogo, 14, Kaliningrad 236016, Russian Federation, e-mail: olesya.evtuhovsk@mail.ru

Valentin V. Gurchenko, Graduate Student of School of Life Science, Immanuel Kant Baltic Federal University, A. Nevskogo, 14, Kaliningrad 236016, Russian Federation, e-mail: benzvalen@gmail.com

Xiaofan Zhai, Ph. D. (Chem), Associate Professor, CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 266071 Qingdao, PR China; Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), 266235 Qingdao, PR China; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, PR China, e-mail: zxf_8968@163.com

Jizhou Duan, Professor, CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 266071 Qingdao, PR China; Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), 266235 Qingdao, PR China; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, PR China, e-mail: duanjz@ms.qdio.ac.cn

Baorong Hou, Academician, CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 266071 Qingdao, PR China; Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), 266235 Qingdao, PR China; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, PR China, e-mail: houbr@qdio.ac.cn

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 621.311

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.028

Тенденции развития забортных пусковых установок для запуска необитаемых подводных аппаратов и образцов морского подводного оружия с подводных носителей (по материалам открытых публикаций)

В.О. Боярчик¹, В.Г. Михлин¹, А.А. Румянцев¹, Р.А. Урусов²¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет²Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин»

Аннотация. Принимая во внимание бурное развитие морской подводной техники для разведки и добычи полезных ископаемых со дна Мирового океана, которое невозможно без широкого использования необитаемых подводных аппаратов (НПА), вопросы, связанные с их отделением от носителя, становятся, несомненно, актуальными. Среди широкой номенклатуры подводных аппаратов, используемых для этих целей, особое место занимают НПА торпедообразной формы. К основной их миссии относятся вопросы разведки мест залегания полезных ископаемых, освещения подводной обстановки при проведении работ, а также вопросы контроля технического состояния оборудования, оснащения мест добычи ископаемых, а также охраны района. В статье анализируются тенденции развития забортных пусковых установок, на основе открытых зарубежных и отечественных публикаций (статей, патентов, рекламных буклетов). Рассмотрены известные технические решения забортных пусковых установок и намечены наиболее перспективные направления развития пусковых установок.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, морское подводное оружие, забортный модуль, пусковая установка, силовая установка.

Development trends of outboard launchers for unmanned underwater vehicles and marine underwater weapons from underwater carriers (based on materials from open publications)

Vladislav O. Boyarchik¹, Valeriy G. Mihlin¹, Artem A. Romyantsev¹, Ruslan A. Urusov²¹State Marine Technical University of Saint-Petersburg²Joint-Stock Company "Central Design Bureau of Marine Engineering "Rubin"

Abstract Taking into account the rapid development of marine underwater equipment for exploration and mining from the bottom of the oceans, which is impossible without the widespread use of unmanned underwater vehicles (UUV), issues related to their separation from the carrier are undoubtedly relevant. Among the wide range of underwater vehicles used for these purposes, a special place is occupied by torpedo-shaped UUV. Their main mission includes issues of exploration of mineral deposits, an overview of the underwater situation during work, as well as issues of monitoring the technical condition of equipment, equipping mining sites, as well as protecting the area. The article analyzes the development trends of overboard launchers based on open foreign and domestic publications (articles, patents, advertising booklets). The well-known technical solutions of overboard launchers are considered and the most promising directions for the development of launchers are outlined.

Keywords: unmanned underwater vehicle, marine underwater weapons, outboard module, launcher, power plant.

Номенклатура необитаемых подводных аппаратов (НПА) и образцов морского подводного оружия (МПО) в настоящее время весьма обширна и в публикациях отслеживается склонность к ее расширению. В рамках настоящей статьи рассмотрим тенденции развития конструктивных решений забортных пусковых установок для НПА и образцов МПО малого калибра (менее 200 мм) торпедообразной формы.

В класс таких НПА входят, прежде всего, самоходные автономные необитаемые подводные аппараты различного назначения, которые условно можно разделить на две группы: освоения мирового океана и военного назначения.

Задачи, в которых планируется применение НПА, при освоении Мирового океана весьма разнообразны от разведки залежей полезных ископаемых до проведения поисковых операций на морском дне. При этом глубина проведения работ может изменяться от десятков метров до 6 и более

километров. Особое место среди прочих задач таких аппаратов занимают задачи, предполагающие одновременное использование их большого количества. Речь может идти о десятках, а иногда и сотнях. С точки зрения требований к пусковой установке массовое применение НПА накладывает дополнительные ограничения.

Аппараты военного назначения условно быть разделены на следующие группы:

- противоминные аппараты – поиск, классификация и обезвреживание мин;
- разведывательные аппараты – сбор данных о подводной обстановке по заданному маршруту;
- аппараты гидроакустической разведки и оповещения о возможной опасности;
- аппараты гидроакустического противодействия атакующим торпедам противника – самоходные имитаторы шумов подводной лодки, самоходные и дрейфующие приборы помех (заградительная помеха);

- боевые аппараты, несущие на себе либо заряд, либо малогабаритную торпеду, например, в задачах борьбы с диверсантами и средствами их доставки.

Создание образцов мины МПО и, в частности, мины торпед в настоящее время является одной из приоритетных задач в системе развития морского подводного оружия разных стран. Специалисты выделяют следующие задачи, в решении которых предполагается применение мины торпед [2, 3]:

- противолодочная оборона;
- противоминная оборона;
- противоторпедная защита;
- противопогрудно-диверсионная оборона.

В [1] приведены данные о направлениях развития сверхмалых образцов МПО иностранных государств, среди которых выделены:

- итальянские и немецкие сверхмалые торпеды (A-200, калибр 123,4 мм; Sea Pike, калибр 124 мм);
- американские антиторпеды (калибр 152 мм);
- шведские одноразовые самоходные противоминные подводные аппараты для борьбы с минами (калибр 120 мм);

- французские противоминные подводные аппараты, в состав которых входят малогабаритные самоходные снаряды-уничтожители мин.

Большое разнообразие аппаратов и образцов МПО предполагаемых для применения с забортных пусковых установок определяет требования к ним, которые не могут быть реализованы в едином техническом решении.

Сегодня часто обсуждается способ запуска с подводного носителя НПА это самовыходом. Это во многом предопределено простотой реализации – требуется только определенное соотношение диаметра пусковой трубы и выпускаемого аппарата. Однако, за этой простотой скрываются серьезные ограничения, такие как сравнительно низкая скорость движения носителя при отделении аппарата от него, требования к аппарату на близкую к нулевой отрицательную плавучесть и т.п. Кроме того, самовыход расходует энергию, которой располагает аппарат и, следовательно, сокращает длительность его миссии. Таким образом, предпочтительным представляется наличие на установке системы принудительного отделения аппарата, которая на эти цели расходует энергию источника внешнего по отношению к аппарату. Ситуация с запуском образцов МПО самовыходом аналогична.

Если рассматривать требования к забортной пусковой установке НПА, то в типичный перечень входят вопросы подзарядки источников питания аппарата в период его нахождения в пусковой установке, обмена информацией носителя с аппаратурой аппарата и ряд других. При этом не накладываются ограничения на шумность отделения.

Для прослеживания тенденций развития забортных пусковых установок был проведен поиск открытых зарубежных и отечественных публикаций (статей, патентов, рекламных буклетов) и произведен их анализ. Рассмотрим известные технические решения забортных пусковых установок.

На мировом рынке известно изделие SeaSpider (калибра 210 мм). Совместная разработка системы

CIRCE фирм Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW, Германия) и Whitehead Alenia Sistemi Subacquei (WASS, Италия). Для запуска изделий фирмой HDW разработана система ТСМ, представляющая собой забортные пусковые установки, объединенные в выдвигаемые контейнерные забортные модули (рис.1). Судя по ассиметричной трубе пускового устройства со специальной направляющей в нижней части, предположительно, в них применена схема с толкателем,двигающимся по направляющей, приводимым в движение энергией сжатого воздуха или пороховыми газами от специального генератора.

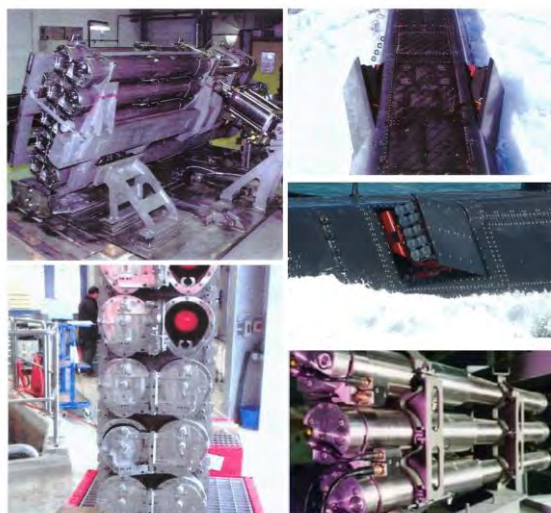


Рис. 1 Забортные пусковые установки средств противоторпедной защиты CIRCE разработки фирмы HDW [6]

Одновременно с этим предлагаются еще два варианта для запуска малогабаритных изделий:

- в виде стационарных модулей в межбортном пространстве (рис. 2а) и
- интеграция пускового устройства в стандартную трубу торпедного аппарата (рис. 2б).



Рис. 2 Стационарные модули в межбортном пространстве (рис. 2а) и интеграция пускового устройства в стандартную трубу торпедного аппарата [6] (рис. 2б).

Фирма WASS разработала свой вариант забортной пусковой установки WASS C303/S (Вариант системы CIRCE). Она представляет собой пусковую трубу с интегрированным в задней части баллоном со сжатым воздухом и специальной регулирующей арматурой (рис.3 и рис.4).

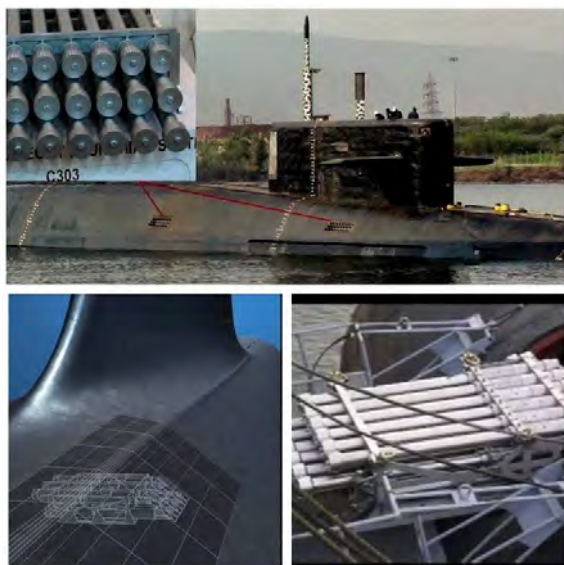


Рис. 3 Расположение забортной пусковой установки WASS C303/S на подводной лодке [6].

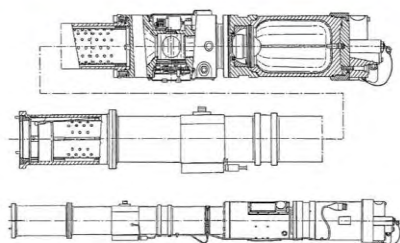


Рис. 4 Пусковая труба с интегрированным в задней части баллоном со сжатым воздухом и специальной регулирующей арматурой [6].

Турецкая фирма Aselsan разработала систему ZOKA, предназначенную для борьбы с атакующими торпедами противника. На рис.5 приведены изображения забортных пусковых установок для запуска изделий этой системы. Об устройстве этих установок практически нет информации, за исключением внешнего вида и что при отделении изделий применяется беспузырная система стрельбы.



Рис. 5 Забортные пусковые установки турецкой фирмы Aselsan для изделий системы ZOKA [12].

Забортными пусковыми установками во Франции занимается фирма Naval Group (бывшая DCNS) для изделий системы «Contralto-S». На рис. 6 приведены изображения этих пневматических пусковых установок.



Рис. 6 Пневматические пусковые установки для изделий системы «Contralto-S» фирмы Naval Group (бывшая DCNS, Франция) [7].

Интерес представляет концепция переноса торпедных аппаратов основного калибра вне прочного корпуса, являясь частью силовой конструкции, при этом реализуется более простая архитектура без необходимости прохождения прочного корпуса (рис. 7). Трубы могут отсоединяться для перезарядки у причала, без необходимости постановки в док. Такое решение представляет несомненный интерес при запуске и возвращении АНПА с подводной лодки.

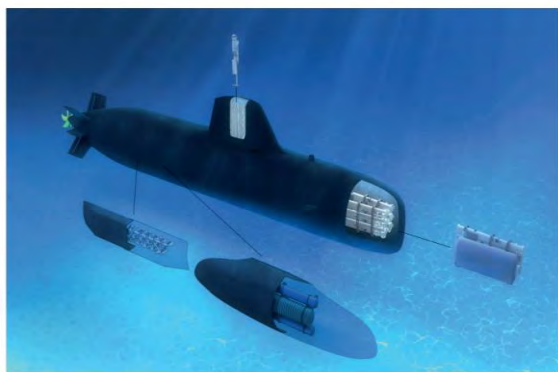


Рис. 7 Концепция ПЛ Scorpene 1000

Израильская фирма Rafael для подводной лодки «Shade» разработала систему противоторпедной защиты с изделиями Torbuster/Scutter с пусковыми установками фирмы Babcock (рис. 8) [8].

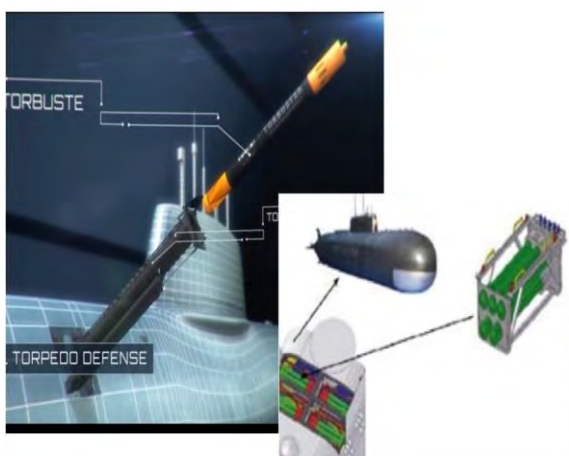


Рис. 8 Расположение на подводной лодке «Shade» забортных пусковых установок для изделий противоторпедной защиты.

В данной пусковой установке применена бесследная воздушная поршневая система стрельбы, количество воздуха в которой не зависит от глубины (рис. 9). Баллон и пусковая труба установки изготовлены из углеволокна.

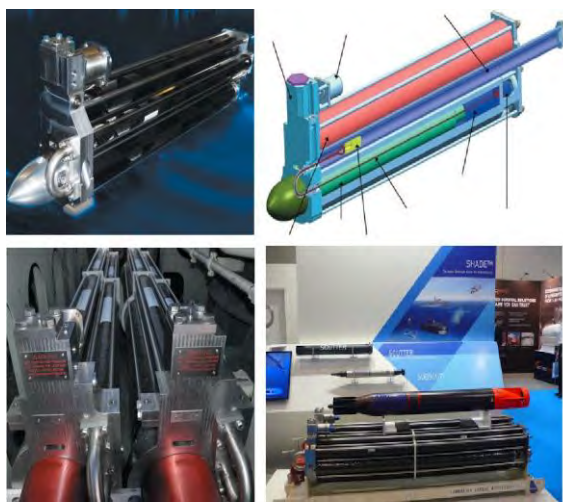


Рис. 9 Забортная пусковая установка фирмы Babcock [9].

В стреляющем устройстве данной пусковой установки применена поршневая схема с силовым пневматическим цилиндром, связанным гибкой связью с поршнем, расположенным за изделием, который непосредственно его и выталкивает. Запас энергии на выстрел хранится в специальном баллоне.

На военно-морском салоне в Санкт-Петербурге в 2019 году АО «СПМБМ «Малахит» продемонстрировало транспортно-пусковой контейнер, предназначенный для транспортирования, сухого хранения и выстреливания изделий с подводных лодок (рис. 10). Предполагаемые места размещения на подводной лодке – межбортное пространство и надстройка [10].



Рис. 10 Транспортно-пусковой контейнер АО «СПМБМ «Малахит» [11].

В заключении рассмотрим несколько патентов по забортным пусковым установкам.

1. Транспортно-пусковой контейнер [4]. В качестве силовой установки, выбрасывающей изделие применен линейный электродвигатель, а само отделяемое изделие расположено в защитных пластинах-роторах, которые сбрасываются после отделения от носителя (рис. 11).

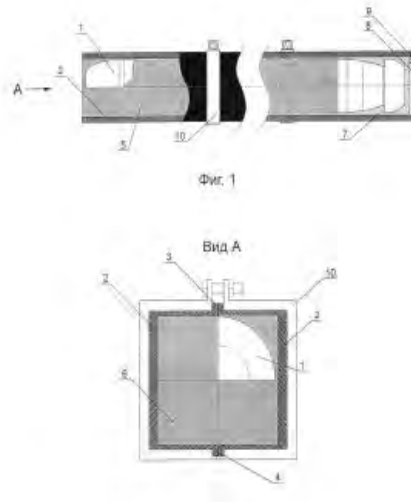


Рис. 11 Транспортно-пусковой контейнер

2. Пусковая установка подводной лодки [5] (рис. 12). К основным отличиям предложения следует отнести:

- расположение пусковой установки – проходит через прочный корпус носителя и может перезаряжаться;
- силовая установка, непосредственно выбрасывающая изделия портного типа;
- поршень разгоняется и тормозится с помощью линейного электродвигателя.

Анализируя приведенные материалы можно отметить некоторые тенденции в развитии забортных пусковых модулей.

Практически все ведущие производители морского подводного оружия и автономных необитаемых подводных аппаратов уделяют существенное внимание созданию модульных масштабируемых забортных пусковых устройств различных калибров от 123 мм до метра и более.

Самовыход изделий применяется практически только для АНПА, но при этом происходит расходование имеющегося на борту аппарата запаса энергии, что приводит к сокращению длительности миссии. Кроме того, для реализации самовыхода требуется, чтобы аппарат имел близкую к нулевой плавучесть.

Разнообразие забортных пусковых установок, предназначенных для выброса (выстреливания) изделий весьма обширно. Однако, и здесь можно выделить некоторые характерные особенности:

- текущие применяемые решения забортных пусковых установок основаны в основном на использовании энергии сжатого воздуха или пороховых газов;
- разработчики стремятся создать установки, обладающие бесследностью и в которых расход энергии не зависит от глубины применения;
- для средств военного назначения, прежде всего приборов гидроакустического противодействия и самоходных имитаторов подводных лодок обеспечить максимальную скрытность;
- минимизировать весогабаритные характеристики силовых устройств;
- в настоящее время ведутся разработки, направленные на применение в будущем забортных пусковых установок для массивного скрытного применения, как АНПА, так и образцов морского подводного оружия с электрогидравлическими силовыми устройствами.

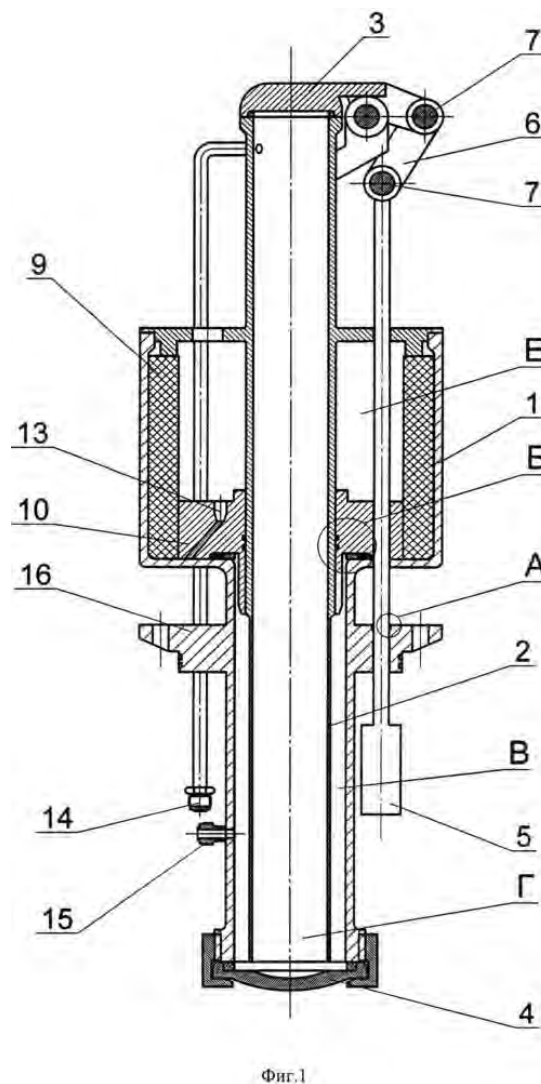


Рис. 12 Пусковая установка подводной лодки,

где:

2 – выбрасываемое изделие;

9 – статор линейного электродвигателя;

10 – поршень-ротор линейного электродвигателя.

Литература

1. Чикалев Ф.М. Состояние и перспективы развития сверхмалых образцов морского подводного оружия ВМС иностранных государств. Морской сборник, №7, 2006 г.
2. Чикалев Ф.М. Определение роли и места сверхмалых торпед в решении задач военно-морского флота. Морской сборник, №11, 2005 г.;
3. Анненков В. Основные направления развития системы противоторпедной защиты кораблей ВМС стран НАТО. Зарубежное военное обозрение, 2002 г.;
4. Транспортно-пусковой контейнер. Патент RU 2581633 от 02.12.2014гг. Авторы: Михлин Валерий Григорьевич, Румянцев Артем Андреевич, Сеньков Алексей Петрович, Белов Борис Петрович. Патентообладатель: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.;
5. Пусковая установка подводной лодки. Патент RU 2648912 от 14.03.2017 г. Авторы: Лавренов Сергей Николаевич, Убытков Михаил Андреевич, Владимиров Тимофей Витальевич, Михлин Валерий Григорьевич, Конюхов Александр Сергеевич, Румянцев Дмитрий Николаевич, Борискин Александр Алексеевич. Патентообладатель: АО "Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения "Малахит" (АО "СПМБМ "Малахит");

6. Официальный сайт Thyssenkrupp-marine systems адрес: <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/tcm.html>;
7. Официальный сайт Naval-group адрес: <https://www.naval-group.com/en/activities/products/#> ;
8. Официальный сайт Rafael адрес: <https://www.rafael.co.il/worlds/naval/underwater-defense-systems/> ;
9. Статья на интернет ресурсе The Engineer адрес: <https://www.theengineer.co.uk/babcock-develops-innovative-anti-torpedo-system/> ;
10. Официальный сайт СПМБМ «Малахит» адрес: <http://www.malachite-spb.ru/155/> ;
11. Военно-технический сборник «Бастион» фото: А.В. Карпенко MBMC-2017 адрес: bastion-karpenko.ru/index;
12. Рекламный ролик на официальном канале Aselsan на видеохостинге YouTube адрес: <https://www.youtube.com/watch?v=RTJmZ2N1SaE> .

References

1. Chikalev F.M. The state and prospects of development of ultra-small samples of marine underwater weapons of the Navy of foreign countries. Marine collection, No. 7, 2006
2. Chikalev F.M. Determining the role and place of ultra-small torpedoes in solving the tasks of the Navy. Marine collection, No. 11, 2005;
3. Annenkov V. The main directions of development of the anti-torpedo protection system for ships of the Navy of the NATO countries. Foreign Military Review, 2002;
4. Transport and launch container. Patent RU 2581633 dated 12/02/2014. Authors: Mikhlin Valery Grigoryevich, Rummyantsev Artem Andreyevich, Senkov Aleksey Petrovich, Belov Boris Petrovich. Patent holder: St. Petersburg State Marine Technical University .;
5. Submarine launcher system. Patent RU 2648912 dated March 14, 2017. Authors: Lavrenov Sergey Nikolaevich, Ubytkov Mikhail Andreevich, Vladimirov Timofey Vitalievich, Mikhlin Valery Grigoryevich, Konyukhov Alexander Sergeevich, Rummyantsev Dmitry Nikolaevich, Boriskin Alexander Alekseevich. Patent holder: JSC "St. Petersburg Marine Bureau of Engineering" Malachite "(JSC" SPMBM "Malachite");
6. The official website of Thyssenkrupp-marine systems address: <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/tcm.html>;
7. Official site Naval-group address: <https://www.naval-group.com/en/activities/products/#>;
8. The official Rafael website address: <https://www.rafael.co.il/worlds/naval/underwater-defense-systems/>;
9. Article on The Engineer Internet resource address: <https://www.theengineer.co.uk/babcock-develops-innovative-anti-torpedo-system/>;
10. The official website of the SPBMS "Malachite" address: <http://www.malachite-spb.ru/155/>;
11. Military-technical collection "Bastion" photo: A.V. Karpenko MBMC-2017 address: bastion-karpenko.ru/index;
12. A commercial on the official Aselsan channel on YouTube's video hosting address: <https://www.youtube.com/watch?v=RTJmZ2N1SaE>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владислав Олегович Боярчик, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: vlad.boyardchik@gmail.com

Vladislav O. Boyarchik, graduate student, State Marine Technical University of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation e-mail: vlad.boyardchik@gmail.com

Валерий Григорьевич Михлин кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: valeriy_mikhlin@mail.ru

Valeriy G. Mihlin, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Senior Researcher, State Marine Technical University of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: valeriy_mikhlin@mail.ru

Артём Андреевич Румянцев, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: eterfinitiy@yandex.ru

Artem A. Rummyantsev, Senior Researcher, State Marine Technical University of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation e-mail: eterfinitiy@yandex.ru

Руслан Алимович Урусов главный конструктор по специальности Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин» 191119, Санкт-Петербург, ул. Марата, 90, e-mail: neptun@skb-rubin.ru

Ruslan A. Urusov, chief designer by specialty, Joint-Stock Company "Central Design Bureau of Marine Engineering" Rubin ", 191119, St. Petersburg, ul. Marat, 90, e-mail: neptun@skb-rubin.ru

УДК 621.77
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.050

Анализ способов изготовления разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей и выбор инструмента для его реализации

К.С. Вахрушев¹, В.Б. Дементьев¹, А.Э. Пушкарев¹, А.П. Блинков²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, ²Санкт-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.

Analysis of methods of manufacturing of differently multi-directional internal twist grooves of tubular body parts and selection of tools for its implementation

Konstantin S. Vahrushev¹, Vyacheslav B. Dementiev¹, Andrei E. Pushkarev¹, Alexey P. Blinkov²

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russian Federation, ²Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation

Abstract. The possibility of intensification of the process of manufacturing of multi-directional internal twist grooves of tubular bodyparts used in ship power plants and launching devices for launch of underwater and aerial unmanned vehicles and their elements experiencing multiple loads during operation is considered. In order to select the most rational and efficient method of manufacturing, functional-structural analysis of used equipment for making internal twist grooves of tubular body parts is used, with the help of which process regularities are found. The identified method of processing, equipment and tool used are the least expensive and most effective to meet the required technical requirements. Analysis of local deformation zones revealed a number of dependent values affecting final force and degree of deformation during manufacture of differently directed internal twist grooves of tubular body parts.

Keywords: Internal grooves, treatment of body pipe parts, functional structural analysis.

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 устройствах подводных и летательных аппаратов. В конструкции [1] 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. 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. Пазы используются для виброгашения и жесткого крепления тросовых стержней. В секции подводного аппарата 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, является применение для подачи жидкости в систему деаэрации трубных деталей с продольно-поперечными пазами. Вышеназванные виды пазов могут формироваться в лазерно-плавильных установках. 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 работе [2]. Основными функциями пазов в стволах являются:

- направление полета снаряда по нарезанному каналу 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 внутреннее нарезание, является дорнование ствольных цилиндрических трубных заготовок. Однако имеющееся оборудование не дает возможности проведения данной технологической операции на трубных заготовках большего диаметра.

Современная и актуальная проблема совершенствования технологии получения внутренних рифлей, образующих ромбические элементы, равномерно распределенные на внутренней поверхности корпусов управляемых авиационных ракет, размещаемых на самолетах и вертолетах корабельного базирования.

Используемые в данный момент технологии прямого редуцирования 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 [3].

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.

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

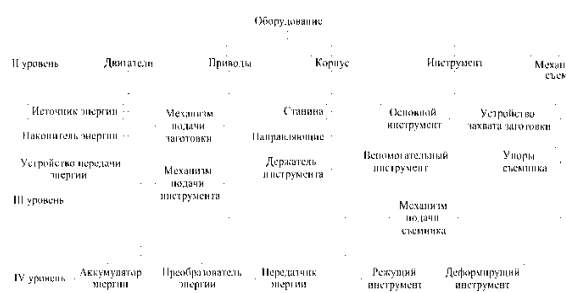


Рис. 1. Структурная модель оборудования для получения винтовых внутренних полостей трубных деталей

трубных ствольных заготовках, фрезерные станки и лазерные обрабатывающие центры проведен в [4]; 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 [5].

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.

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



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

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 разнаправленных 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 разнаправленных внутренних пазов трубных корпусных деталей является штамповка в обкатывающем инструменте. Для реализации процесса необходимо более подробно рассмотреть инструмент для реализации процесса изготовления разнаправленных 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 прессы 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.

Описанная технология осуществляется с помощью устройства, 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.

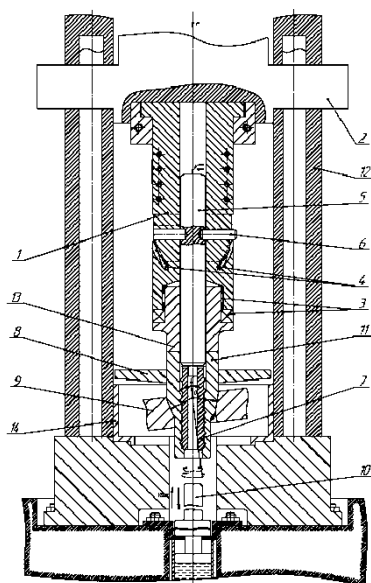


Рис. 3. Устройство для формирования пазов в обкатывающем инструменте:

- 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 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 удастся достичь за счет выбора длин контактных поверхностей матрицы L , величины подачи пресса, угла наклона матрицы относительно оси подачи Q .

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.

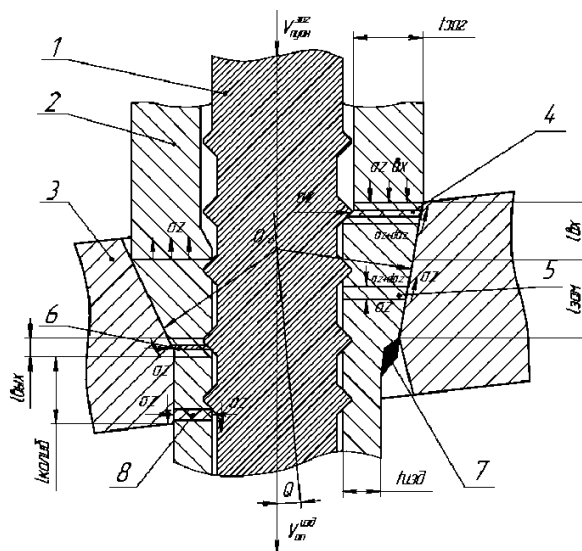


Рис. 4. Схема разбивки зональной деформации заготовки:

- 1 – винтовой пуансон, 2 – заготовка, 3 – обкатывающая матрица, 4–8 – локальные зоны деформации

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 внутренних 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.

Для расчета значения осевого усилия и степени деформации в каждой из замкнутых локальных зон необходимо провести многофакторный расчет, с помощью программы, реализованной на ЭВМ. В расчете учтены такие факторы, как величина подачи инструмента (в частности, скорость перемещения ползуна), угол наклона матрицы относительно оси подачи, длины локальных зон деформации.

Заключение

1. Проведен анализ 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. Рассмотрение способов изготовления вышеперечисленных изделий является неотъемлемой частью данного анализа, показывающей наиболее часто применяемые технологические процессы для изготовления внутренних винтовых пазов и имеющиеся недостатки технологических процессов.

2. С помощью созданной структурной модели выявлено, что наиболее эффективным оборудованием для изготовления внутренних винтовых пазов в различных корпусных изделиях является штамповка на гидравлических вертикальных прессах, позволяющих применить

способ редуцирования, поскольку последние имеют наиболее надежную двигательную часть, обеспечены независимыми и надежными приводами как прямого, так и обратного хода, надежной станиной, воспринимающей разные виды нагрузок, обладают возможностью использования широкого спектра инструмента для деформирования заготовок, снабжены возможностью применения обратного цилиндра для съема и извлечения заготовки.

3. Функционально-структурный анализ позволил обнаружить ряд закономерностей и выявить ряд недостатков при учете которых удастся сократить и упростить технологический цикл производства, повысить качество изделий и снизить затраты на изготовление разнонаправленных внутренних винтовых пазов трубных корпусных деталей.

4. Применение штамповки в обкатывающем инструменте позволяет выполнить все необходимые функции по видам и качеству обработки поверхностей, сложности изготовления обрабатываемого инструмента. При этом траектория движения инструмента, благодаря углу наклона оси, представляет собой окружность. За

время одного цикла при объемной штамповке обкатыванием, независимо от траектории движения, пластической деформации подвергается вся заготовка по окружности и проталкивание по направлению движения прессы позволяет проводить деформацию трубной заготовки в необходимый размер. Совмещение этих двух движений приводит к винтообразному перемещению локального очага пластической деформации по заготовке.

5. 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.

6. С помощью анализа 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 98396 Рос. Федерация. Катапульта / Г.С. Аленченков, А.Э. Пушкарев. №2010119280/11; опубл. 20.10.2010. Бюл. № 29.
2. Зайцев А.С. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 387с.
3. Аленченков И.С., Пушкарев А.Э. Функционально- структурный анализ и синтез механизмов роторной линии // Вестник ИжГТУ. 2011 №2(50) С. 7–11.
4. 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.
5. 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.

References

1. Patent na poleznuyu model' 98396 [Utility Model Patent 98396] Russian Federation. Catapult / G. S. Lenchenkov, A. E. Pushkarev. No. 2010119280/11; publ. 20.10.2010. Bull. No. 29.
2. Zaitsev, A. S. Device and designing trunks artillery guns. - StaryOskol: TNT, 2017. - 387с.
3. Alenchenkov I.S., Pushkarev A.E. Funkcional'no- strukturnyj analiz i sintez mekhanizmov rotoornoj linii [Functional-structural analysis and synthesis of rotor line mechanisms] // Bulletin of IzhSTU. 2011 No. 2 (50) pp. 7–11.
4. Govorov Yu.V. Frezernaya obrabotka poverhnoстей po traektoriyam obrabotki v vide V-splajnov [Surface milling along processing paths in the form of B-splines] // Modern problems of improving the work of railway transport .– M.: Moscow State University of Railway Engineering (MIIT). 2015 No. 11, pp. 77–31.
5. Tregubov V.I., Larin S.N. et al. Silovye rezhimy operacii rotacionnoj vytyazhki trubnyh zagotovok po trekhrolikovoj skheme plasticheskogo deformirovaniya [Power modes of the operation of rotational drawing of pipe billets according to the three-roller scheme of plastic deformation]// IzvestiyaTulGU. Technical science. 2016 Vol. 5. S 44-51.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Константин Сергеевич Вахрушев, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 7, e-mail: omd4nik@list.ru, тел. 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

Konstantin S.Vahrushev, Aspirant, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7, Studencheskay str., 426069, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: omd4nik@list.ru , phone 8-909-055-14-75

Vyacheslav B. Dementiev, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7, Studencheskay str., 426069, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: 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

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

Andrei E. Pushkarev, Dr. Sci. (Eng), professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7, Studencheskay str., 426069, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: 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

УДК 532.5:001.5
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.051

Анализ установившегося течения в круговой цилиндрической трубе с гидравлически гладкими стенками

В.А. Павловский¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Анализируются формулы для скоростей и сопротивлений при установившемся течении несжимаемой вязкой жидкости в круглой цилиндрической трубе. Используется закон подобия скоростей при турбулентном режиме течения для получения представления коэффициента сопротивления в явном виде. Рассматривается связь между числами Рейнольдса, вычисляемых по средней и по динамической скоростями. Сформулирован принцип нахождения профилей скорости по закону сопротивления. Приведены аналитические выражения для всего универсального профиля скоростей. Приводится алгоритм построения кривой сопротивления по профилю скоростей в универсальных координатах. Предлагается единая формула для коэффициента сопротивления при любом режиме течения и формула для учёта отклонения от логарифмики на профиле скоростей в области вблизи оси трубы.

Ключевые слова: круглая цилиндрическая труба, вязкость, режимы течения, число Рейнольдса, законы сопротивления, универсальный профиль скоростей, вязкий подслой, буферная зона, закон подобия скоростей.

Analysis of steady flow in a circular cylindrical pipe with hydraulically smooth walls

Valery A. Pavlovsky¹

¹St. Petersburg State Marine Technical University

Abstract. The formulas for the velocities and resistances in the steady flow of an incompressible viscous fluid in a round cylindrical pipe are analyzed. The law of similarity of velocities in the turbulent regime is used to obtain an explicit representation of the drag coefficient. The relationship between the Reynolds numbers calculated by the average and dynamic speeds is considered. The principle of finding velocity profiles according to the law of resistance is formulated. Analytical expressions are given for the for any flow regime and a formula for taking into account deviations from the logarithm on the velocity profile in the region near the pipe axis.

Key words: round cylindrical pipe, viscosity, flow regimes, Reynolds number, laws of resistance, universal velocity profile, viscous sublayer, buffer zone, law of similarity of velocities

Введение

Для установившегося режима течения в прямой круговой трубе вдали от входа профиль скоростей не меняется вдоль оси трубы от сечения к сечению. Имеет место одна компонента скорости – продольная скорость $u(r)$, зависящая от одной, радиальной координаты r . Уравнение движения в напряжениях для течения в трубе в цилиндрической системе координат имеет вид [1,2]:

$$-\frac{dp}{dz} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r\tau) = 0, \quad (1)$$

где p – давление, τ – касательное напряжение, z – продольная координата, направленная вдоль оси трубы. Величина градиента давления при этом является постоянной: $\frac{dp}{dz} = const < 0$. Решение задачи о нахождении профиля скоростей и сопротивления удобно выполнять, вводя в рассмотрение безразмерные величины – безразмерную координату η , отсчитываемую от стенки, и безразмерную скорость v :

$$\eta = \frac{y}{R}, \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad v = \frac{u}{v_*}, \quad (2)$$

где R – радиус трубы, y – расстояние от стенки, $u = R - r$, v_* – динамическая скорость, которая определяется через значение касательного напряжения на стенке:

$$v_* = \sqrt{\frac{|\tau_w|}{\rho}} \quad \tau_w = \frac{1}{2} \frac{dp}{dz} R$$

Тогда согласно (1) можно записать выражение для всего касательного напряжения через

динамическую скорость $\tau = -\rho v_*^2 (1 - \eta)$, а безразмерную среднюю скорость по сечению трубы представить в виде:

$$v_{cp} = 2 \int_0^1 v(\eta)(1 - \eta) d\eta \quad (3)$$

Для дальнейших расчетов полезно кроме числа Рейнольдса определяемого через среднюю скорость $Re = \frac{2Rv_{cp}}{\nu}$, где R – радиус трубы, v_{cp} – средняя скорость, ν – кинематический коэффициент вязкости, ввести также в рассмотрение число Рейнольдса по динамической скорости: $Re_* = \frac{Rv_*}{\nu}$. Связь этих чисел Рейнольдса между собой следующая: $Re = \frac{2Rv_{cp}}{\nu} = 2 \frac{Rv_*}{\nu} \cdot \frac{v_{cp}}{v_*} = 2Re_* \cdot v_{cp}$. Коэффициент сопротивления для течения в круглой трубе определяется формулой:

$$\lambda = \frac{8|\tau_w|}{\rho v_{cp}^2} = \frac{8}{v_{cp}^2} \quad (4)$$

1. Скорости и сопротивления

Рассмотрим характеристики скоростей и сопротивлений для течения жидкости в трубе при различных режимах течения. Для установившегося ламинарного течения уравнение движения в безразмерном виде: $\frac{dv}{d\eta} = Re_*(1 - \eta)$ после интегрирования его с учетом граничного условия прилипания приводит к следующему безразмерному параболическому профилю скорости: $v = Re_* \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right)$. Если ввести в рассмотрение новую безразмерную (универсальную в случае

турбулентного режима течения) координату уравнение $y_* = \eta \cdot Re_*$, т.е.: $y_* = \frac{yv_*}{v}$, то получаем профиль скоростей ламинарного режима течения в универсальных координатах (y_*, v) (универсальных для турбулентного режима, но не для ламинарного):

$$v = y_* \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{y_*}{Re_*} \right) \quad (5)$$

Видно, что для каждого значения Re_* , а следовательно, и для каждого значения числа Рейнольдса Re по средней скорости в этих координатах профили скоростей будут разными (Рис.1) и тем самым координаты (y_*, v) для ламинарного режима течения не являются универсальными

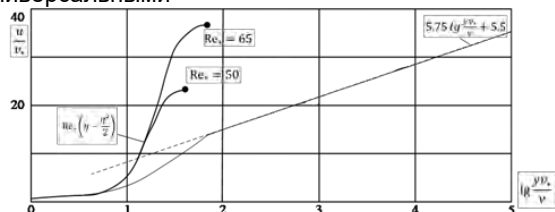


Рис.1. Ламинарные профили скоростей в универсальных координатах для разных чисел Re_* на фоне универсального профиля турбулентного режима течения вместе с логарифмикой, вязким подслоем и буферной зоной

Подстановка в формулу (3) выражения (5) для профиля скорости приводит к следующему значению средней скорости:

$$v_{cp} = 2 Re_* \int_0^1 \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) (1 - \eta) d\eta = \frac{Re_*}{4} \quad (5)$$

Истинное число Рейнольдса, определяемое через среднюю скорость u_{cp} как $Re = \frac{2Ru_{cp}}{v}$, можно вычислить через Re_* согласно формуле $Re = 2Re_* \cdot v_{cp}$, которая дает с учетом (6) для ламинарного режима течения выражение: $Re = Re_*^2 / 2$, т.е. $Re_*^2 = 2Re$.

Коэффициент сопротивления, определяемый формулой (4) с учетом (6) для ламинарного режима течения будет равным: $\lambda = \frac{128}{Re_*^2}$, или, после подстановки в это выражение величины $Re_*^2 = 2Re$, получаем известный закон сопротивления Хагена – Пуазейля для ламинарного течения в трубе: $\lambda = \frac{64}{Re}$.

Для турбулентного режима течения логарифмический профиль скорости в гидравлически гладкой трубе, как известно, можно записать в безразмерном виде следующим образом

$$v = 5.75 \lg y_* + 5.5 \quad (7)$$

Этот профиль был получен в опытах Никурадзе. [3] В универсальных координатах (y_*, v) можно построить универсальный логарифмический профиль скоростей, который для течения в гладкой трубе по результатам многочисленных экспериментов [1,2] показан на рис.1 согласно зависимости (7) в виде прямой наклонной линии для логарифмического масштаба оси абсцисс. Из этого рисунка следует, что можно выделить следующие три зоны для турбулентного потока. Первая зона – зона вязкого подслоя, для которой опытные данные дают значение $y_* = \frac{yv_*}{v} < 5$, где безразмерный профиль скоростей имеет вид $v = y_*$. Вторая зона описывает плавный переход от линейного профиля

скорости к логарифмическому. Эту зону называют буферной, в ней действуют как вязкостные, так и турбулентные напряжения, для нее $5 < y_* < 30, v = 5 \ln y_* - 3.05$. Третья зона – логарифмическая, в ней течение полностью определяется турбулентными напряжениями. На оси трубы наблюдается некоторое отклонение от логарифмического закона. Все пристенные турбулентные течения в универсальных координатах $(y_* - v)$ имеют профили скорости близкие к изображенному на рис.3, отличаясь от него лишь числовыми характеристиками.

2.Связь между числами Re_* и Re

Из определения коэффициента сопротивления

$\lambda = \frac{8|\tau_w|}{\rho u_{cp}^2} = \frac{8}{v_{cp}^2}$, согласно (8) следует, что $\frac{u_{cp}}{v_*} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}}$. Это равенство дает связь между числами Рейнольдса, вычисленными по динамическими и средней скоростями:

$$Re_* = \frac{1}{2} Re \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \quad (8)$$

Обработка экспериментальных данных на основе этой формулы позволяет установить связь между этими числами Рейнольдса. На рис. 2 приведены соответствующие кривые зависимости $Re_*(Re)$ для ламинарного и турбулентного режимов течения. Заметим, что по числам Re_* и Re можно вычислить закон сопротивления: $\lambda = 8 \left(\frac{Re_*}{Re} \right)^2$.

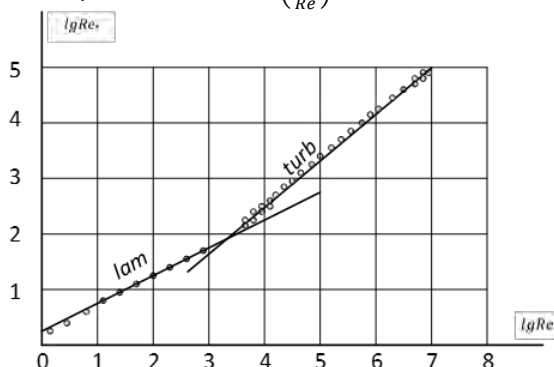


Рис.2 Зависимость $Re_*(Re)$ для ламинарного и турбулентного режимов

Кривые зависимости Re_* от (Re) можно аппроксимировать формулами:

- для ламинарного режима:

$$Re_* = \sqrt{2Re} \quad (9)$$

- для турбулентного режима:

$$Re_* = 0.0624 Re^{0.915} \quad (10)$$

3.Законы сопротивления по универсальному профилю скоростей

Универсальному профилю скоростей (7) соответствует универсальный закон сопротивления. Действительно, из универсального закона подобия: $v = v_{max} + 2.5 \ln \frac{y}{R}$ после вычисления по нему средней скорости по сечению трубы можно получить: $v_{max} - v_{cp} = 3.75$ [1,2]. Далее после записи по профилю $v = 2.5 \ln y_* + 5.5$ выражения для максимума скорости (он на оси трубы, где $y = R, y_* = Re_*$): $v_{max} = 2.5 \ln Re_* + 5.5$ имеем: $3.75 + v_{cp} =$

2.5 ln Re* + 5.5. Отсюда, заменяя число Re* числом Рейнольдса, вычисленному по средней скорости, и учитывая связь между v_{cp} и коэффициентом сопротивления, можно получить формулу Прандтля-Никурадзе :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (11)$$

Таким образом из универсального логарифмического профиля скоростей получен универсальный закон сопротивления логарифмического вида. Этот вывод теории блестяще подтверждается данными опытов. Формула (11) дает искомую связь между λ и Re в неявном виде, поэтому Никурадзе дал её аппроксимацию, представив эту связь в явном виде:

$$\lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \quad (12)$$

Близость этой формулы (11) к эксперименту показана на рис.3, где изображен график сопротивления в координатах (lg Re – lg(100λ)) для течения в трубе [1]. На этом графике штрихами показана для сравнения прямая, соответствующая широко известной в гидравлике формуле Блазиуса [2]:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}, \quad (13)$$

а также прямая, соответствующая ламинарному режиму.

Между кривыми сопротивления ламинарного и турбулентного режимов лежит переходный участок, который в технических расчетах принимают расположенным в диапазоне чисел Рейнольдса 2300 ≤ Re << 10000.

Рис.3. Закон сопротивления для течения в гладкой трубе: 1 – по формуле Хагена-Пуазейля; 2 – по формуле Прандтля-Никурадзе; 3 – по формуле Блазиуса.

Формулу (11) можно переписать, выделяя в явном виде число Рейнольдса:

$$Re = \frac{2.51}{\sqrt{\lambda}} \cdot 10^{\frac{1}{(2\sqrt{\lambda})}} \quad (14)$$

4.Использование закона подобия скоростей для получения представления коэффициента сопротивления в явном виде

Универсальный закон подобия подобия: v = v_{max} + 2.5 ln $\frac{y}{R}$ также позволяет дать другую формулировку записи профиля скорости в универсальных координатах, используя выражение v = v_{max} – 5.75 lg $\frac{R}{y}$. Величину v_{max} здесь можно выразить через среднюю скорость v_{cp} согласно формуле: v_{max} = v_{cp} + 3.75, а учитывая что v_{cp} = $\sqrt{\frac{8}{\lambda}}$, имеем:

$$v = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} + 3.75 - 5.75 \lg \frac{R}{y} \quad (15)$$

Поскольку величину $\frac{y}{R}$ можно представить в виде отношения числа Рейнольдса по динамической скорости к универсальной координате $\frac{R}{y} = \frac{Re_*}{y_*}$, то профиль скоростей (15) запишется в виде: v = 5.75 lg y* + $\left(\sqrt{\frac{8}{\lambda}} - 5.75 \lg Re_* + 3.75 \right)$. Но исходный универсальный профиль скорости в логарифмической зоне течения имеет вид: v = 5.75 lg y* + 5.5. Это означает, что выражение в скобках правой части предыдущей формулы должно

быть равным 5.5. Тогда имеем: $\sqrt{\frac{8}{\lambda}} - 5.75 \lg Re_* + 3.75 = 5.5$, или:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 5.75 \lg Re_* + 1.7 \quad (16)$$

Отсюда коэффициент сопротивления можно записать в виде: $\lambda = \frac{8}{(5.75 \lg Re_* + 1.75)^2}$.

Если выразить величину Re* через Re, то выражение для λ принимает вид:

$$\lambda = \frac{8}{(5.2613 \lg Re - 5.1777)^2} \quad (17)$$

Эта формула является аналогом формулы (11), но, в отличие от нее, она дает выражение для коэффициента сопротивления в явном виде.

5.О нахождении профилей скорости по закону сопротивления

Как показал Прандтль, по результатам измерений скорости при турбулентном течении жидкости в гидравлически гладкой круглой трубе можно найти закон сопротивления для этого течения. Тем самым была получена формула (11) из формулы (7). Возникает вопрос о возможности решения обратной задачи – восстановления универсального профиля скорости по результатам измерений или расчетов коэффициентов сопротивления в трубах. Рассмотрим этот вопрос.

Пусть имеется закон сопротивления, например для течения в гидравлически гладкой круглой трубе: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} =$

$-2 \lg \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}}$. Для каждого значения числа Рейнольдса можно указать свое значение коэффициента сопротивления λ. Задача заключается в необходимости выражения через эти интегральные величины локальных характеристик поля скоростей. На основе анализа экспериментальных данных можно выполнить сопоставление интегральных характеристик течения локальным, учитывая на присущий этим характеристикам физический смысл. Такое сопоставление дает для средней скорости величину (v – γ), где γ = 3.75, числу Рейнольдса – универсальную координату, умноженную на сопоставленную среднюю скорость, коэффициенту сопротивления – сопоставленную среднюю скорость:

$$\left. \begin{aligned} v_{cp} &\rightarrow (v - \gamma) \\ Re &\rightarrow 2y_*(v - \gamma) \\ \frac{1}{\sqrt{\lambda}} &\rightarrow \frac{1}{2\sqrt{2}}(v - \gamma) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Выполняя такое сопоставление для каждой величины, фигурирующей в формуле (11) получаем вместо этой формулы: $\frac{1}{2\sqrt{2}}(v - \gamma) = -2 \lg \frac{2.51}{2y_*(v - \gamma)}$. $\frac{(v - \gamma)}{2\sqrt{2}}$, откуда следует выражение для профиля скорости, учитывая, что γ = 3.75:

$$v = 4\sqrt{2} \lg \frac{4\sqrt{2}}{2.51} y_* + 5.75$$

Простейшие преобразования этого выражения приводят к формуле:

$$v = 5.65 \lg y_* + 5.75 \quad (19)$$

Эта запись формулы для профиля скоростей в универсальных координатах дает практически те же результаты что и формула Прандтля (7) с погрешностью не более 2%.

Распространенное сопоставление применительно к формуле Блазиуса дает:

$$\frac{8}{(v-\gamma)^2} = \frac{0.3164}{(2y_*(v-\gamma))^{0.25}}, \quad \text{откуда :}$$

$$v = \left[\frac{(2y_*)^{0.25}}{\left(\frac{0.3164}{8}\right)^{1.75}} \right] + 3.75 \quad (20)$$

Применительно к формуле $\lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}$, такое сопоставление приводит к выражению для профиля скорости:

$$\frac{8}{(v-\gamma)^2} = 0.0032 + \frac{0.221}{[2y_*(v-\gamma)]^{0.237}} \quad (21)$$

Разрешая это трансцендентное уравнение при $\gamma = 3.75$, можно построить соответствующую (21) зависимость $v(y_*)$ для профиля скорости в универсальных координатах. В таблице 2 дано сравнение полученных при сопоставлении формул (19) – (21) с универсальным профилем скорости Прандтля – Никурадзе (7).

Таблица 2.

Сравнение формул (19)-(21) с формулой Прандтля-Никурадзе.

y*	v			
	Прандтль, формула (7)	формула (19)	формула (20)	формула (21)
10 ²	17.00	17.05	17.25	18.56
10 ³	22.75	22.70	22.51	23.14
10 ⁴	28.50	28.35	29.82	28.47
10 ⁵	34.25	34.00	39.97	34.16

Видно в принципе удовлетворительное совпадение полученных при сопоставлении профилей скорости с логарифмическим профилем скоростей Прандтля – Никурадзе.

6. Аналитические выражения для всего универсального профиля скоростей

Записать аналитически выражение для универсального профиля скорости, охватывая все зоны течения - ламинарный подслой, буферную зону и логарифмический участок – можно по-разному. Рассмотрим следующие три способа такой записи.

1) В неявном виде, по Сполдингу [4]:

$$y_* = v + e^{-A} \left[e^{kv} - 1 - kv - \frac{(kv)^2}{2!} - \frac{(kv)^3}{3!} - \frac{(kv)^4}{4!} \right] \quad (22)$$

где $A=2.12$; $k=0.41$

2) В явном виде, полученном нами по результатам обработки экспериментальных данных [1-3]:

$$v = a \cdot th\left(\frac{y_*}{a}\right) + [2.5 \ln(1 + y_*)] \cdot t \quad (23)$$

где $a=5.5$; $t = \frac{1}{2} \left[1 + th\left(\frac{y_*}{7} - 0.42\right) \right]$

Заметим, что для этих двух способов представления (22) и (23): $v|_0 = 0$; $\left. \frac{dv}{dy_*} \right|_0 = 0$. $v|_{y \rightarrow \infty} \rightarrow 2.5 \ln y_* + 5.5$

3) В кусочном виде, записывая выражения отдельно для каждой из трех зон течения: [1]

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq y_* \leq 5; & \quad v = y_* \\ 5 \leq y_* \leq 30; & \quad v = 5 \ln y_* - 3.05 \\ y_* \geq 30; & \quad v = 2.5 \ln y_* + 5.5 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Эти три формулы равноценны и дают при расчете практически один и тот же профиль скорости в универсальных координатах, за исключением буферной зоны.

7. Построение кривой сопротивления по профилю скоростей в универсальных координатах

Построить график сопротивления при течении в трубе для турбулентного режима течения можно также путем непосредственного интегрирования профиля скорости турбулентного течения в универсальных координатах. Для этого следует записать прежде всего аналитическое выражение для этого профиля. Формы записи такого выражения, которые охватывают все три зоны течения: ламинарный подслой, буферную зону и логарифмический участок, представлены формулами (22) – (24).

По имеющимся аналитическим выражениям $v(y_*)$ для профилей скоростей (22), (23), (24) можно находить значения коэффициентов сопротивления. Для этого вычисляются безразмерные средние скорости по сечению трубы по формуле (3). Её можно записать в несколько другом виде, учитывая, что $y_* = \eta Re_*$:

$$v_{cp} = 2 \int_0^1 v(y_*) \left(1 - \frac{y_*}{Re_*}\right) d\left(\frac{y_*}{Re_*}\right) \quad (25)$$

Каждому значению числа Рейнольдса по динамической скорости Re_* соответствует свое значение средней скорости v_{cp} . А по нему можно вычислить коэффициент сопротивления λ и соответствующее число Рейнольдса Re , определяемое по средней скорости. На рис.4 показаны результаты расчетов сопротивления, которые оказываются практически одинаковые для всех трех способов выражения профиля скоростей в универсальных координатах по формулам (22), (23), (24). При малых значениях Re_* сопротивление соответствует формуле Пуазейля $\lambda = \frac{64}{Re}$. Далее, при возрастании числа Re_* , кривая сопротивления плавно соскальзывает на кривую Блазиуса и далее отклоняется от нее, подчиняясь формуле Прандтля – Никурадзе.

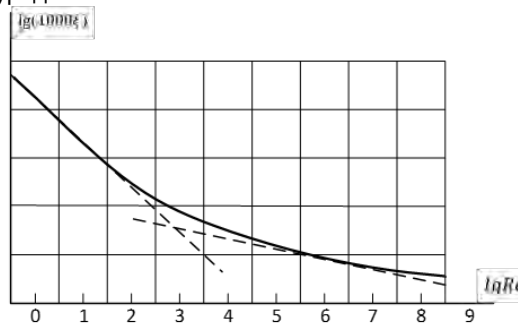


Рис.4. Закон сопротивления для течения в трубе; сплошная линия – расчет, пунктирные соответствуют $\lambda = \frac{64}{Re}$ и закону Блазиуса.

Здесь следует заметить, что для чисел Рейнольдса $Re > 2300$, пренебрежение вязким подслоем и буферной зоной не вносит существенной погрешности при вычислении коэффициента сопротивления. Это видно, например, из представления профиля скорости (24) не в кусочном виде, а в виде единой кривой, соответствующей логарифмическому профилю:

$$0 < y_* \leq Re_*; \quad v = 2.5 \ln(y_* + 1) + 5.5 \quad (26)$$

Здесь под знак логарифма добавлена единица, позволяющая вести интегрирование от

стенки, от $y_* = 0$. Эта единица не вносит какого-либо существенного вклада в логарифмический профиль скорости и закон сопротивления который соответствует формуле Прандтля – Никурадзе:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}}$$

8. Единая формула для коэффициента сопротивления при произвольном режиме течения

Участок перехода от ламинарного режима течения, к турбулентному, наблюдаемый в экспериментах, можно показать на графике сопротивления. Он виден после записи выражения для коэффициента сопротивления, справедливого для всех чисел Рейнольдса, включая участок перехода от ламинарного режима течения, к турбулентному при течении в гидравлически гладкой трубе

$$\lambda = \left(\frac{64}{Re}\right) Q_1 + \left(0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}\right) Q_2 \quad (27)$$

где Q_1 и Q_2 – весовые функции, определяемые выражениями:

$$Q_1 = \frac{1}{2}(1 - th\gamma); \quad Q_2 = \frac{1}{2}(1 + th\gamma); \quad (28)$$

Аргумент γ в этих выражениях является функцией числа Рейнольдса:

$$\gamma = 0.0025(Re - 3000).$$

На рис.5 показан график сопротивления, подчиняющийся формуле (27) и охватывающий ламинарный режим течения, переходную зону и далее турбулентный режим

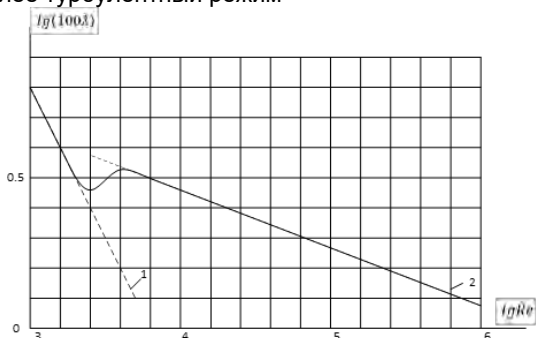


Рис. 5. График сопротивления согласно формуле (27); 1 – сопротивление по формуле Хагена-Пуазейля, 2 – сопротивление по формуле (12).

9. Отклонение от логарифмики на профиле скоростей

Известно [5,6], что логарифмическая зона занимает сравнительно небольшую часть профиля скоростей (порядка 20%), однако она оказывает решающее влияние на характер сопротивления. Эта зона подчиняется выражению $v = 2.5 \ln y_* + 5.5$. Отклонение от логарифмики приводит на оси трубы к нулевой производной профиля скорости по радиальной координате. Это отклонение можно назвать зоной внешнего течения. В ней профиль скорости в универсальных координатах можно представить в виде:

$$v = s \ln \left(y_* - 0.5 \frac{y_*^2}{Re_*} \right), \quad (29)$$

где $s = \frac{2.5 \ln(\alpha Re_*) + 5.5}{\ln(\alpha Re_* - 0.5 \frac{(\alpha Re_*)^2}{Re_*})}$, величина α характеризует

долю логарифмической зоны, а оставшаяся часть $(1 - \alpha)$ характеризует зону внешнего течения. Эту величину α можно принять равной $\alpha = 0.25$. Тогда универсальный профиль скорости в кусочном виде будет следующим:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq y_* \leq 5; & v = y_* \\ 5 \leq y_* \leq 30; & v = 5 \ln y_* - 3.05 \\ 30 \leq y_* \leq \alpha Re_* & v = 2.5 \ln y_* + 5.5 \\ \alpha Re_* \leq y_* \leq Re_* & v = s \ln \left(y_* - 0.5 \frac{y_*^2}{Re_*} \right) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

где $s = \frac{2.5 \ln(\alpha Re_*) + 5.5}{\ln(\alpha Re_* - 0.5 \frac{(\alpha Re_*)^2}{Re_*})}$, $\alpha = 0.25$

Построенная по этому профилю кривая сопротивления практически повторяет кривую Прандтля – Никурадзе: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}}$, но на оси трубы приводит к нулевой производной профиля скорости по радиальной координате.

Литература

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1974. 711с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1987. 840с.
3. Прандтль Л. Гидроаэродинамика. Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002. 572с.
4. Дин Р.Б. Единая формула для полного профиля скорости в турбулентном пограничном слое/Труды амер. о-ва инж.-мех. Теор. Основы инж. расчетов. 1976. №4. с. 240-245
5. Эртель Г-м. Путеводитель Прандтля по гидроаэродинамике.- М.: Ижевск: Регулятор. и хаотич.динамика:Ин-т компьютер. Исслед., 2007.-774с.
6. Павловский В.А. Никущенко Д.В. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы. – СПб.: Лань, 2018.-368с.

Reference

1. Shlikhting G. Teoriya pogranchnogo sloya. M.: Nauka. 1974. 711s.
2. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. M.: Nauka. 1987. 840s.
3. Prandtl' L. Gidraerodinamika. Moskva - Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika». 2002. 572s.
4. Din R.B. Yedinaya formula dlya polnogo profilya skorosti v turbulentnom pogranchnom sloye. o-va. inzh.-mekh. Teor. Osnovy inzh. raschety. 1976. №4. s. 240-245
5. Ertel Gm. Prandlya guide to hydroaerodynamics. - M.: Izhevsk: Regulator. and chaotic dynamics: Inst computer. Issled., 2007.-774s.
6. Pavlovsky V.A. Nikushchenko D.V. Computational fluid dynamics. Theoretical basis. - SPb.: Doe, 2018.-368с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Алексеевич Павловский, профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Теплофизических основ судовой энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, 190121, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Valery A. Pavlovsky, professor, Dr. Sci. (Phys & Math), professor of Department of Thermophysical Basis of ship energetics, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya st., 3, St. Petersburg 190121, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

УДК 621.01:004
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.052

Подготовка обоснованных исходных данных для аналитических и экспериментальных исследований крутильных колебаний универсальной дизель – генераторной установки ДГ-8,83

М.А. Минасян¹, Ц. Цзэн¹, А.М. Минасян¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Крутильные колебания упруго-массовых систем относятся к тем опасным динамическим нагрузкам, которые могут приводить к аварийным повреждениям валов, упругих муфт и других элементов энергетических установок с дизельным приводом.

Указанные особенности побудили авторов на первом этапе аналитических и экспериментальных исследований крутильных колебаний универсальной дизель – генераторной установки ДГ-8,83 подготовить обоснованные исходные данные. Для этой цели определены моменты инерции и податливости элементов крутильной системы по известным эмпирическим формулам, по методу конечных элементов и частично экспериментально. Затем на основе анализа и обобщения полученных результатов проведен обоснованный выбор моментов инерции и податливостей в качестве уточненных исходных данных.

На базе выбранных исходных данных авторы намерены приступить к расчету крутильных колебаний с жестким и упругим соединением дизеля с генератором.

Для обеспечения точности аналитических и экспериментальных исследований крутильных колебаний других дизельных установок авторы рекомендуют, прежде всего, подготовки обоснованных исходных данных.

Ключевые слова: Дизель-генератор, момент инерции, податливость, коленчатый вал, маховик, жесткое соединение, метод конечных элементов.

Preparation of reasonable initial data for analytical and experimental studies of torsional vibrations of the universal diesel generator set DG-8.83

Minas A. Minasyan¹, Armen M. Minasyan¹, Junjie Zeng¹

¹State marine technical university of Saint-Petersburg

Abstract Torsional vibrations of elastic-mass systems belong to those dangerous dynamic loads that can lead to emergency damage to shafts, elastic couplings and other elements of power plants with a diesel drive.

These features prompted the authors to prepare reasonable initial data at the first stage of analytical and experimental studies of torsional vibrations of the universal diesel generator set DG-8.83. For this purpose, the moments of inertia and pliability of the elements of the torsion system are determined using known empirical formulas, the finite element method, and partially experimentally. Then, based on the analysis and generalization of the results obtained, a reasonable choice of moments of inertia and pliability was made as updated initial data.

Based on the selected initial data, the authors intend to start calculating torsional vibrations with a rigid and elastic connection of a diesel engine with a generator.

To ensure the accuracy of analytical and experimental studies of torsional vibrations of other diesel installations, the authors recommend, first, the preparation of reasonable initial data.

Key words: Diesel-generator, moment of inertia, stiffness, crankshaft, flywheel, rigid connection, Finite element method.

Введение

Улучшение показателей машин приводит к увеличению их быстроходности, повышению энергонапряженности, усложнению рабочих процессов и конструктивных схем. Одним из задач исследования состоит в теоретическом и экспериментальном определении частот и форм свободных крутильных колебаний, а также в анализе возможных методов оценок степени опасности колебаний.

Из различных методов при расчетах усложненных колебательных систем включающие не только коленчатый вал, но и связанные с ним механизмы наилучший результат дает метод конечных элементов, но требующий значительных усилий расчетчика по разработке конечно-элементной модели и организации численного эксперимента. Если разница между значениями крутильной жесткости, определенными по различным эмпирическим формулам и МКЭ, превышает 5 - 7%,

рекомендуется ее экспериментальное определение. С учетом выше представленных особенностей, целью работы является подготовка обоснованных исходных данных для аналитических и экспериментальных исследований крутильных колебаний универсальной дизель – генераторной (ДГ) установки ДГ-8,83, в составе дизеля 2Ч 8,5/11 и генератора постоянного тока КГ-5,6 соединенные оригинальной канатной муфтой.

Поставленная цель достигается реализацией следующих задач:

1. Определение моментов инерции и податливостей элементов крутильной системы:
 - по известным эмпирическим формулам; [1],
 - [2]
 - по методу конечных элементов (МКЭ);
 - экспериментально; [3]
 - обоснованный выбор моментов инерции и податливостей в качестве уточненных исходных данных.

I. Характеристика объекта исследования

Дизель-генераторная установка обеспечивает возможность жесткого и упругого соединения, в частности с помощью оригинальной канатной муфты.

В данной работе рассматривается жесткий вариант соединения дизеля с генератором.

Двигатель развивает на номинальном режиме при частоте вращения вала 1500 об/мин мощность 8,83 кВт.

Элементы, входящие в крутильную систему ДГ представлены на рис. 1(1).

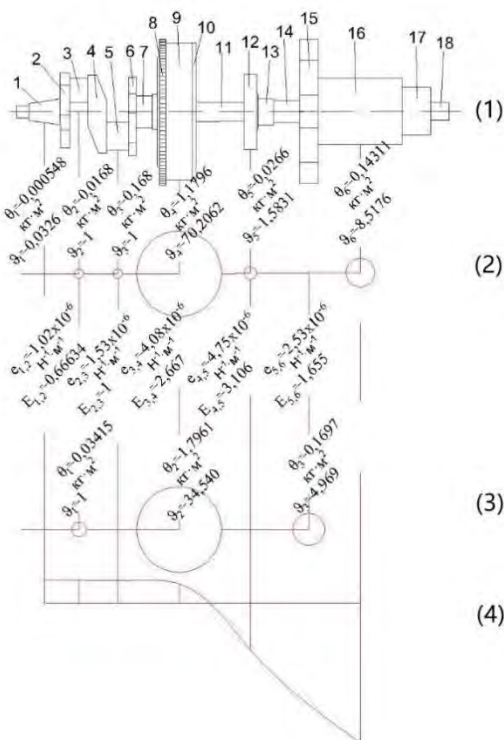


Рисунок 1 – Эскиз элементов крутильной системы ДГ (1), крутильные схемы (2, 3) и одноузловая форма частоты свободных крутильных колебаний (4)

1 – передняя часть неполноопорного КВ с коренной шейкой I кривошипа; 2 – щека колена I кривошипа; 3 – шатунная шейка I кривошипа; 4 – промежуточная щека I и II кривошипов; 5 – II шатунная шейка кривошипа; 6 – щека II кривошипа; 7 – коренная шейка II кривошипа с торцевой конической частью (шпоночное соединение маховика); 8 – зубчатый венец маховика; 9 – маховик; 10 – промежуточный диск; 11 – жесткое соединение дизеля с генератором; 12 – диск фланца генератора; 13 – цилиндрическая часть фланца генератора; 14 – передняя часть вала генератора; 15 – вентилятор; 16 – якорь; 17 – коллектор; 18 – свободная часть вала генератора.

II. Определение податливостей элементов крутильной системы ДГ

1. Податливость кормовой части коленчатого вала (рис. 1) [4]

$$e_k = \frac{32}{\pi G} \frac{l}{d^4} \frac{d}{3D} \left(1 + \frac{d}{D} + \frac{d^2}{D^2} \right) = 5,09 \times 10^{-7} H^{-1} \cdot m^{-1} \quad (1)$$

где $d=0,042m$; $D=0,06m$; $l=0,1m$; $E=2,1 \cdot 10^{11} N/m^2$ – модуль упругости коленчатого вала; $\mu=0,3$ – коэффициент Пуассона для стали; $G=E/[2(1+\mu)]=8,07 \times 10^{10} Pa$ – модуль сдвига материала вала

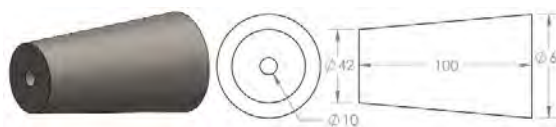


Рис.2 – твердотельная модель и эскиз носовой части КВ

2. Податливость колена вала по формуле Терских: (рис. 1)

Промежуточная щека кривошипов I и II цилиндров [4] [6]

$$e_{кол} = \frac{32}{\pi \cdot G} \cdot \frac{H_{КВ} + 0,5R}{d_{КВ}^4 - \delta_{КВ}^4} = 1,53 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot m^{-1} \quad (2)$$

где $d_{КВ}=0,06, \delta_{КВ}=0,02$ – средние для шеек вала наружный и внутренний диаметры [м]; $R=0,055$ – радиус кривошипа [м]; $H_{КВ}=0,1275m$.

$$e_{КОЛ}^{МКЭ} = 1,39 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot m^{-1}$$

Погрешность:

$$\varepsilon_{КОЛ} = 9,85\%$$

3. Податливость колена вала по модифицированной формуле Кер -Вильсона (рис. 1, 4, 8)

Учитывая, что у двигателя КВ является неполноопорным, то для определения податливости может быть использована формула Кер-Вильсона[4] [5]

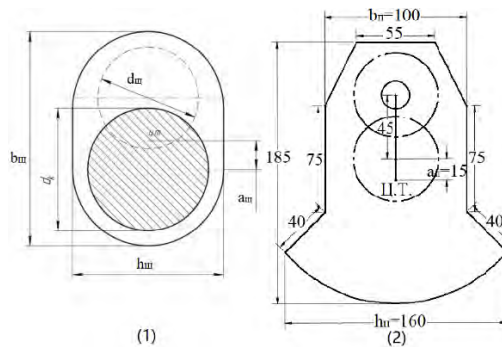


Рис. 3– Эскиз щеки КВ

$$e_n = e + \frac{24}{\pi \cdot G} \left(\frac{L_{шшш}}{D_{шшш}^4 - d_{шшш}^4} + \frac{4R}{h_1 B_1^3} \right) = 1,89 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot m^{-1} \quad (3)$$

где: e – суммарная податливость частей А и С колена (рекомендуют использование формулы Таплина), а второе слагаемое выражает податливость промежуточной щеки шириной B_1 с прилегающими участками шатунных шеек [4]

$$e = \frac{32}{\pi G} \left[\frac{L_{ку} + 0,15 D_{ку} D_{ку}^4 - (D_{ку}^4 - d_{ку}^4)^2}{L_{шш} + 0,15 d_{шш} d_{ку}^4 + (D_{шш}^4 - d_{шш}^4)^2} = 6,53 \times 10^{-7} H^{-1} \cdot м^{-1} \right] \quad (4)$$

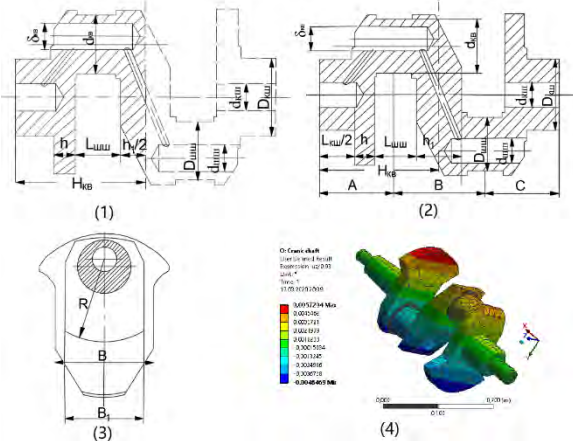


Рис. 4 – Коленчатый вал

(1), (2), (3) – эскизы I и II колен, двух колен и щеки; (4) – конечно – элементная модель.

$$e_H^{МКЭ} = 1,78 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1}$$

Погрешность:

$$\varepsilon_H = 6,01\%$$

4. Податливость коренной шейки кривошипа II цилиндра с торцевой конической частью для жесткого шпоночного соединения с маховиком дизеля

4.1. Податливость коренной шейки кривошипа II цилиндра (рис. 1, 8) [2]

$$e_{H1} = \frac{32}{\pi G} \frac{l_{H1}}{d_{H1}^4} \left[1 - \left(\frac{\delta_{H1}}{d_{H1}} \right)^4 \right]^{-1} = 6,08 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (5)$$

где: $l_{H1}=0,05м$ – длина 1-ой носовой части коленчатого вала; $d_H=0,032м$ – наружный диаметр 1-ой носовой части коленчатого вала; $\delta_{H1}=0,01м$ – внутренний диаметр 1-ой носовой части коленчатого вала.

4.2. Податливость торцевой конической части коленчатого вала, соединяющая с маховиком

$$e_{H2} = \frac{32}{\pi G} \frac{l_{H2}}{d_{H2}^4} = 5,55 \times 10^{-7} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (6)$$

где: $l_{H2}=0,057м$ – длина 2-ой носовой части коленчатого вала; $d_H=0,006м$ – диаметр 2-ой носовой части коленчатого вала.

Суммарная (рис. 2с)

$$e_{HOC} = e_{H1} + e_{H2} = 6,63 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (7)$$

Погрешность:

$$\varepsilon_H = 4,75\%$$

Податливость коленчатого вала (рис. 2, 9)

$$e_{КВ}^T = e_{HOC} + 2e_{колена} + e_K = 1,02 \times 10^{-5} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (8)$$

$$e_{КВ}^K = e_{HOC} + e_H + e_K = 9,03 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (9)$$

$$e_{КОЛ}^{МКЭ} = 9,28 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1}$$

5. Податливость зубчатого венца маховика

$$e_\delta = \frac{32}{\pi G} \frac{l_\delta}{d_\delta^4} \left[1 - \left(\frac{\delta_\delta}{d_\delta} \right)^4 \right]^{-1} = 1,50 \times 10^{-10} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (10)$$

где: $l_\delta=0,015м$ – толщина дисковой части; $d_\delta=0,36м$, $\delta_{ф-в}=0,05м$ – наружный и внутренний диаметр дисковой части.

6. Податливость маховика (рис. 1, 5) [2]

$$e_{max} = e_\delta + e_\psi = 7,62 \times 10^{-10} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (11)$$

$$e_\psi = \frac{32}{\pi G} \frac{l_\psi}{d_\psi^4} \left[1 - \left(\frac{\delta_\psi}{d_\psi} \right)^4 \right]^{-1} = 6,11 \times 10^{-10} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (12)$$

где: $l_\psi=0,07м$ – толщина цилиндрической части; $d_\psi=0,36м$, $\delta_{ф-в}=0,22м$ – наружный и внутренний диаметр цилиндрической части.

$$e_{max}^{МКЭ} = 7,0 \times 10^{-10} H^{-1} \cdot м^{-1}$$

Погрешность:

$$\varepsilon_{max} = 8,86\%$$

7. Податливость промежуточного диска

$$e_\phi = e_{\phi1} + e_{\phi2} = \frac{l_{\phi1}}{GJ_{\phi1}} + \frac{l_{\phi2}}{GJ_{\phi2}} = 6,1 \times 10^{-10} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (13)$$

где: $l_{\phi1}=l_{\phi2}=0,01м$ – толщина части 1 и 2 фланца; $d_{\phi1}=0,22кг \cdot м^2$, $d_{\phi1}=0,364кг \cdot м^2$ – диаметр 1 и 2 части фланца.

$$e_\phi^{МКЭ} = 6,45 \times 10^{-10} H^{-1} \cdot м^{-1}$$

Погрешность:

$$\varepsilon_\phi = 5,26\%$$

8. Податливость жесткого соединения дизеля с генератором

$$e_{жс} = \frac{32}{\pi G} \frac{l_{жс}}{d_{жс}^4} = 2,55 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (14)$$

Где $l_{жс}=0,126м$ – длина вала; $d_{жс}=0,05м$ – диаметр вала.

Погрешность:

$$\varepsilon_{жс} = 4,45\%$$

9. Податливость диска фланца генератора

$$e_{\phi-м} = \frac{32}{\pi G} \frac{l_{\phi-м}}{d_{\phi-м}^4} \left[1 - \left(\frac{\delta_{\phi-м}}{d_{\phi-м}} \right)^4 \right]^{-1} = 2,56 \times 10^{-10} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (15)$$

где: $l_{\phi-м}=0,032м$ – длина части фланца соединена с валом; $d_{\phi-м}=0,1м$, $\delta_{\phi-м}=0,2м$ – наружный и внутренний диаметр части фланца соединена с валом, место $\delta_{\phi-м}$ принимается диаметр окружности, на которой размещаются соединительные болты [2], [4]

10. Податливость цилиндрической части фланца генератора (рис. 1, 6)

$$e_{\phi-в} = \frac{32}{\pi G} \frac{l_{\phi-в}}{d_{\phi-в}^4} \left[1 - \left(\frac{\delta_{\phi-в}}{d_{\phi-в}} \right)^4 \right]^{-1} = 3,22 \times 10^{-7} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (16)$$

где: $l_{\phi-в}=0,045м$ – длина части фланца соединена с валом; $d_{\phi-в}=0,07м$, $\delta_{\phi-в}=0,05м$ – наружный и внутренний диаметр части фланца соединена с валом. [2], [4]

Суммарная податливость:

$$e_{\phiс} = e_{\phi-в} + e_{\phi-м} = 3,23 \times 10^{-7} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (17)$$

$$e_{\phiс}^{МКЭ} = 3,297 \times 10^{-7} H^{-1} \cdot м^{-1}$$

Погрешность:

$$\varepsilon_{\phiс} = 2,17\%$$

11. Податливость передней часть вала генератора

$$e_{вал} = \frac{32}{\pi G} \frac{l_{вал}}{d_{вал}^4} = 4,87 \times 10^{-7} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (18)$$

где: $l_{вал}=0,05м$ – длина вала; $d_{вал}=0,06м$ – диаметр вала. [4]

12. Податливость вентилятора генератора (рис. 1, 6)

12.1 Для лопастей вентилятора [4]:

$$e_{лоп} = \frac{l_{лоп}}{GJ_{лоп}} = 2,06 \times 10^{-8} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (19)$$

где: $J_{лоп}=S_{лоп}R_{лоп}^2$; $l_k=0,075м$ – длина коллектора; $d_k=0,12м$, $\delta_v=0,06м$ – наружный и внутренний диаметр коллектора; $S_{лоп}$ – поперечная площади лопастей; $R_{лоп}=0,255м$ – расстояние от центра вала до центральной точки лопасти; $l_{лоп}=0,05м$ – длина пластины; $b_{лоп}=0,002м$, $h_{лоп}=0,129м$ – толщина и ширина лопастей.

12.2 Для корпуса вентилятора [4]

$$e_{корп} = \frac{32}{\pi G} \frac{l_{корп}}{d_{корп}^4} = 2,42 \times 10^{-11} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (20)$$

где: $l_{корп}=0,002м$ – толщина корпуса; $d_{корп}=0,38м$ – диаметр корпуса.

Податливость:

$$e_{вент} = e_{лоп} + e_{корп} = 2,06 \times 10^{-8} H^{-1} \cdot м^{-1}$$

13. Податливость якоря (рис. 1, 7)

Для металлических пластин якоря [2]

$$e_{пл} = \frac{32}{\pi G_M} \frac{l_{я}}{d_{пл}^4} \left[1 - \left(\frac{\delta_{пл}}{d_{пл}} \right)^4 \right]^{-1} = 9,87 \times 10^{-8} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (21)$$

где: $l_{пл}=0,22м$ – длина якоря; $d_{пл}=0,17м$, $\delta_{пл}=0,122м$ – наружный и внутренний диаметр коллектора; Модуль упругости меди: $E=1 \cdot 10^{11} Н/м^2$; Коэффициент Пуассона для стали $\mu=0,35$. Модуль сдвига материала вала определяется по выражению [4]

$$G_M = \frac{E}{2(1+\mu)} = 3,7 \times 10^{10} Па \quad (22)$$

14. Коллектор генератора (рис. 1, 7)

- коллектора без вала [2]

$$e_k = \frac{32}{\pi G} \frac{l_k}{d_k^4} \left[1 - \left(\frac{\delta_k}{d_k} \right)^4 \right]^{-1} = 4,61 \times 10^{-8} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (23)$$

где: $l_k=0,075м$ длина коллектора; $d_k=0,12м$, $\delta_v=0,06м$ – наружный и внутренний диаметр коллектора.

15. Податливость торцевой части вала генератора (рис. 2, 8)

-вала коллектора [4]:

$$e_v = \frac{l_v}{GJ_v} = \frac{32}{\pi G} \frac{l_v}{d_v^4} = 1,54 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1} \quad (24)$$

где: $l_v=0,05м$ – длина вала; $d_v=0,045м$ – диаметр вала. -коллектор:

$$e_{колл} = e_v + e_k = 1,59 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1}$$

Податливость ротора:

$e_{рот} = e_{колл} + e_{пл} + e_{вент} + e_{вал} = 2,196 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1}$ - ротора по МКЭ:

$$e_p^{МКЭ} = 2,28 \times 10^{-6} H^{-1} \cdot м^{-1}$$

Погрешность:

$$\varepsilon_p = 3,63\%$$

Таблица 1

Результаты расчета податливости

№	Название	Обозначение	Значение, Н ⁻¹ ·м ⁻¹	Погрешность
1	Коленчатый вал	Терских	1,02×10 ⁻⁵	9,91%
		Кер-Вильсона	9,03×10 ⁻⁶	2,69%
1,1	Колена по формуле	Терских	1,53×10 ⁻⁶	9,85%
		Кер-Вильсона	1,89×10 ⁻⁶	6,01%
2	Маховик	ε _{мах}	7,62×10 ⁻¹⁰	8,86%
3	Промежуточный диск	ε _ф	6,10×10 ⁻¹⁰	5,26%
4	Жесткое соединение	ε _ж	2,55×10 ⁻⁶	4,45%
5	Диск фланца генератора	ε _{фс}	3,23×10 ⁻⁷	2,17%
6	Ротор генератора	ε _{рот}	2,20×10 ⁻⁶	7,37%

III. Определение моментов инерции масс крутильной системы

1. Момент инерции передней части вала с коренной шейкой кривошипа I цилиндра неполноопорного коленчатого вала

- Кормовой части КВ:

$$\theta_{корм} = \theta_{ка} + \theta_{кб} = \frac{1}{2} \pi \left[l_{ка} (R_{ка}^4 - r_{ка}^4) + l_{кб} (R_{кб}^4 - r_{кб}^4) \right] = 5,48 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (25)$$

где: M_{ка}, M_{кб} – массы кормовой части а и b, M_{ка}=πl_{ка}ρ(R_{ка}²-r_{ка}²); M_{кб}=πl_{кб}ρ(R_{кб}²-r_{кб}²); l_{ка}=0,1м; l_{кб}=0,036м – дна кормовой части а и b; R_{ка}=0,0256м; R_{кб}=0,012м – наружный радиус кормовой части, а (среднее) и b; r_{ка}=0,005м; r_{кб}=0,005м – внутренний радиус кормовой части а и b.

- 3D модели программа SolidWorks

$$\theta_{корм-3D} = 5,76 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Погрешность:

$$\varepsilon_{корм}^{3D-p} = 4,86\%$$

2. Момент инерции щеки колен (рис. 1, 3) [4]

$$\theta_{щ} = \frac{h_{щ} b_{щ}}{12} (h_{щ}^2 + b_{щ}^2) l_{щ} \rho + m_{щ} a_{щ}^2 - 2 \pi r_{отв}^2 d_{отв} \rho a_{щ}^2 = 0,0186 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (26)$$

где: m_щ=l_щh_щb_щρ – масса щеки, кг; a_щ², l_щ, h_щ, b_щ – толщина, ширина и высота щеки, l_щ=0,046 м; h_щ=0,075м; b_щ=0,165м; r_{отв}=0,025м; d_{отв}=0,04м; a_щ=0,045м;

3. Момент инерции шатунной шейки кривошипов колен [4]:

$$\theta_{ш} = \theta'_{ш} + m_{ш} R^2 = \frac{\pi d_{ш}^4}{32} l_{ш} \rho + \frac{\pi d_{ш}^2}{4} l_{ш} \rho R^2 = 0,0034 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (27)$$

где: θ'_ш – момент инерции шатунной шейки относительно сои, проходящей через центр вала; m_ш – масса шатунной шейки; R – радиус кривошипа, R=0,055м; d_ш – диаметр шатунной шейки, d_ш=0,06м; l_ш – длина шатунной шейки, l_ш=0,045м

4. Момент инерции промежуточной щека кривошипов I и II цилиндров

$$\theta_n = \theta'_n + m_n a_n^2 = \frac{h_n b_n}{12} (h_n^2 + b_n^2) l_n \rho + l_n h_n b_n \rho = 0,008 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (28)$$

где: m_n=l_nh_nb_nρ, b_n=0,1м; l_n, h_n, b_n – толщина, ширина и высота щеки, l_n=0,02м; h_n=0,16м; b_n=0,1м; a_n=0,015м.

5. Момент инерции коренной шейки кривошипов II цилиндра с торцевой конической частью для жесткого шпоночного соединения с маховиком дизеля [2]

$$\theta_n = \frac{1}{2} \pi \left[l_{на} (R_{на}^4 - r_{на}^4) + l_{нб} R_{нб}^4 \right] = 6,05 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (29)$$

5.1. Момент инерции коренной шейки кривошипа II цилиндра

$$\theta_n = \frac{1}{2} \pi \left[l_{на} (R_{на}^4 - r_{на}^4) \right] = 3,98 \times 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (30)$$

5.2. Момент инерции торцевой конической части КВ

$$\theta_n = \frac{1}{2} \pi \left[l_{на} (R_{на}^4 - r_{на}^4) \right] = 3,98 \times 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (31)$$

где: ρ=7800кг/м³ – плотность материала коленчатого вала, l_{на}=0,05м, R_{на}=0,016м, r_{на}=0,005, l_{нб}=0,057м, R_{нб}=0,03м.

3D модель программа SolidWorks:

$$\theta_{n-3D} = 6,15 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Погрешность:

$$\varepsilon_n^{3D-p} = 1,63\%$$

Расчётный момент инерции коленчатого вала равен сумме моментов инерции каждой части:

$$\theta_{к-расч} = \theta_n + 2\theta_{щ} + 2\theta_n + \theta_{корм} = 0,04 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (32)$$

6. Моменты инерции зубчатого венца и маховика

- маховика как сумма моментов инерции трех его частей (2):

$$\theta_{max-расч} = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{1}{2} M_i (R_i^2 + r_i^2) \right] - 8\theta_{отв} = 1,027 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (33)$$



Рис. 5 – 3D модель и разрез фланца, и размеры. (1) – маховик (2) – промежуточный диск

где: i – номер части маховика; m_i – масса каждой части маховика, кг; $m_i = \pi l_i \rho (R_i^2 - r_i^2)$; l_i – толщина i -й части маховика, м; R_i , r_i – наружный и внутренний радиусы i -ых частей маховика, м; $\theta_{отв}$ – момент инерции отверстия на маховике $\theta_{отв} = M_{отв} R_{отв}^2 = \pi l_{отв} \rho R_{отв}^2 r_{отв}^2$, кг·м²; $l_{отв} = 0,02$ м – глубина отверстия; $r_{отв} = 0,01$ м – радиус отверстия; $R_{отв} = 0,075$ м – расстояние от отверстия до центральной оси; $\theta_{отв} = 3,44 \times 10^{-4}$ кг·м².

- 3D модели программа SolidWorks:

$$\theta_{max-3D} = 1,012 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Погрешность:

$$\varepsilon_{max}^{3D-p} = 1,48\%$$

7. Момент инерции промежуточного диска

$$\theta_{\phi} = \theta_{\phi 1} + \theta_{\phi 2} = \frac{1}{2} m_{\phi 1} R_{\phi 1}^2 + \frac{1}{2} m_{\phi 2} R_{\phi 2}^2 = 0,152 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (34)$$

где: $m_{\phi 1} = \pi R_{\phi 1}^2 l_{\phi 1} \rho$; $l_{\phi 1} = 0,01$ м; $m_{\phi 2} = \pi R_{\phi 2}^2 l_{\phi 2} \rho$, $l_{\phi 2} = 0,01$ м.

По 3D модель программа SolidWorks:

$$\theta_{\phi-3D} = 0,151 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Погрешность:

$$\varepsilon_{\phi}^{p-3D} = 0,66\%$$

8. Момент инерции жесткого соединения дизеля с генератором

$$\theta_{жс} = \frac{1}{2} m_{жс} r_{жс}^2 = 0,0006 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (35)$$

где: $m_{жс} = \rho \cdot \pi \cdot G_{жс} \cdot l_{жс} = 1,98$ кг.

Погрешность:

$$\varepsilon_{жс}^{p-3D} = 0,5\%$$

9. Момент инерции диска фланца генератора

$$\theta_{\phi c} = \theta_{\phi c 1} + \theta_{\phi c 2} + \theta_{\phi c 3} - 8\theta_{отв} = 0,026 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (36)$$

где: $\theta_{\phi c 1} = 1/2 \cdot \pi \cdot l_{\phi c 1} \cdot \rho \cdot (R_{\phi c 1}^4 + r_{\phi c 1}^4) = 0,036$ кг·м², $l_{\phi c 1} = 0,032$ м – толщина фланца, $R_{\phi c 1} = 0,05$ м, $r_{\phi c 1} = 0,1$ м – наружный и внутренний радиус фланца; $\theta_{\phi c 2} = 1/2 \cdot \pi \cdot l_{\phi c 2} \cdot \rho \cdot (R_{\phi c 2}^4 + r_{\phi c 2}^4) = 3,73 \times 10^{-4}$ кг·м², $l_{\phi c 2} = 0,005$ м – толщина фланца; $R_{\phi c 2} = 0,05$ м, $r_{\phi c 2} = 0,02$ м – наружный и внутренний радиус фланца.

10. Момент инерции цилиндрической части фланца генератора

$$\theta_{\phi c 3} = \frac{1}{2} \pi l_{\phi c 3} \rho (R_{\phi c 3}^4 + r_{\phi c 3}^4) = 5,44 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$l_{\phi c 3} = 0,04$ – толщина фланца; $R_{\phi c 3} = 0,035$ м, $r_{\phi c 3} = 0,025$ м – наружный и внутренний радиус фланца; $\theta_{отв} = M_{отв} R_{отв}^2 = \pi l_{отв} \rho R_{отв}^2 r_{отв}^2 = 0,0014$ кг·м², $l_{отв} = 0,032$ м – глубина отверстия; $r_{отв} = 0,0185$ м – радиус отверстия; $R_{отв} = 0,0725$ м – расстояние от отверстия до центральной оси.

- по 3D модель, программа SolidWorks:

$$\theta_{\phi c-3D} = 0,0257 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Погрешность:

$$\varepsilon_{\phi c}^{p-3D} = 1,15\%$$

11. Момент инерции ротора генератора КГ-5,6 как сумма моментов инерции коллектора, якоря и вентилятора:

$$\theta_{рот} = \theta_{колл} + \theta_{я} + \theta_{вент} \quad (37)$$

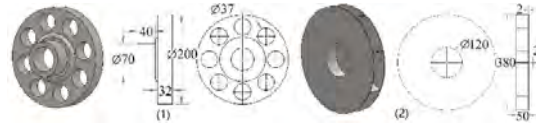


Рис. 6 – 3D модель и эскиз (1) – диск фланца генератора, (2) – вентилятора

11.1. Момент инерции передней части вала генератора [4]

$$\theta_{кв} = \frac{1}{2} m_{кв} r_{кв}^2 = \frac{1}{2} \pi r_{кв}^4 l_{кв} \rho = 4,96 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (38)$$

где: $l_{кв} = 0,05$ м – длина вала; $r_{кв} = 0,03$ м – диаметр вала.

11.2. Момент инерции вентилятора генератора

$$\theta_{вент} = \theta_{корп} + \theta_{лоп} = 0,11 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (39)$$

где: $\theta_{корп} = 1/2 M_{корп} R_{вент}^2 = 0,06$ кг·м² [4], $M_{корп} = 2\pi R_{вент}^2 l_{корп} \rho = 3,53$ кг; $R_{вент} = 0,19$ м – радиус корпуса; $l_{корп} = 0,002$ м – толщина корпуса; $\theta_{лоп} = 8 M_{лоп} R_{лоп}^2 = 0,051$ кг·м², $M_{лоп}$ – масса лопастей, кг, $M_{лоп} = l_{лоп} \rho_{лоп} h_{лоп} b_{лоп}$, кг, $l_{лоп} = 0,05$ м; $b_{лоп} = 0,002$ м – толщина и ширина лопастей; $h_{лоп} = 0,129$ м; $M_{лоп} = 0,1$ кг; $R_{лоп} = 0,255$ м – расстояние от центра вала до центральной точки лопасти.

11.3. Момент инерции якоря генератора

Якорь состоит из 78 медных пластин и 1 керамического внутреннего сердечника (рис. 7b);

$$\theta_{я} = \theta_{пл} + \theta_{сер} = m_{пл} R_{пл}^2 + \frac{1}{2} m_{сер} (R_{сер}^2 + r_{сер}^2) = 0,062 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (40)$$

где: $M_{пл} = 78 b_{пл} h_{пл} l_{пл} \rho_{мед} = 7,015$ кг; $b_{пл} = 0,002$ м – ширина пластины, $h_{пл} = 0,024$ м – высота пластины, $l_{я} = 0,22$ м – длина якоря; $M_{сер} = \pi (R_{сер}^2 - r_{сер}^2) l_{я} \rho_{мед} = 4,48$ кг; $R_{сер}$ и $r_{сер}$ – наружный и внутренний радиус сердечника, $R_{сер} = 0,061$ м, $r_{сер} = 0,03$ м.

3D модель программа SolidWorks:

$$\theta_{я-3D} = 0,052 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Погрешность

$$\varepsilon_{я}^{p-3D} = 16,1\%$$

11.4. Момент инерции коллектора генератора

- вала коллектора [4]:



Рис. 7 – 3D модель и размеры (1) – коллектора, (2) – якоря

$$\theta_{колл} = \theta_{в} + \theta_{к} = \frac{1}{2} m_{в} R_{в}^2 + \frac{1}{2} m_{к} (R_{к}^2 + r_{к}^2) = 0,00337 кг \cdot м^2 \quad (41)$$

где: $m_{в} = \pi R_{в}^2 l_{в} \rho_{мед} = 0,8 кг$ – масса вала. $\rho_{мед} = 8200 кг/м^3$ – плотность меди; $R_{в} = 0,025 м$ – радиус вала; $m_{к} = \pi l_{к} \rho_{кер} (R_{к}^2 - r_{к}^2) = 1,38 кг$; $l_{к}$ – длина коллектора; $\rho_{кер}$ – плотность керамики; $R_{к}$ и $r_{к}$ – наружный и внутренний радиус коллектора.

3D модель программа SolidWorks:

$$\theta_{колл-3D} = 0,0038 кг \cdot м^2$$

Погрешность:

$$\varepsilon_{колл}^{3D-p} = 11,3\%$$

$$\theta_{рот} = \theta_{колл} + \theta_{я} + \theta_{вент} = 0,176 кг \cdot м^2 \quad (42)$$

$$\theta_{рот-3D} = 0,15 кг \cdot м^2$$

Погрешность:

$$\varepsilon_{рот}^{3D-p} = 17,3\%$$

IV Экспериментальное определение моментов инерции КВ и маховика

Определили массу КВ вала $m_{к} = 14,7 кг$. Затем подвешиванием коленчатого вала на двух тросах согласно рисунку 9 и поворачиванием на $10^\circ - 15^\circ$ вдоль центральной оси и скручиванием стальных канатов обеспечиваем колебательные движения КВ относительно оси вращения.

Определив период этих колебаний, по формуле:

$$T_{к} = \frac{\tau}{10}, с \quad (43)$$

находим момент инерции КВ по формуле [4]:

$$\theta_{к-экс} = \frac{m_{к} g a b T_{к}^2}{16 \pi^2 l}, кг \cdot м^2 \quad (44)$$

где: $g = 9,81 м/с^2$ – ускорение свободного падения; a и b – расстояние между двумя тросами в местах закрепления, m ; $l = 0,307 м$ – расстояние от нижней точки крепления до балки.

Среднее значение момента инерции коленчатого вала при $b = 0,385 м$:

$$\theta_{к-экс1} = 0,037 кг \cdot м^2$$

Среднее значение момента инерции КВ при $b = 0,19 м$:

$$\theta_{к-экс2} = 0,038 кг \cdot м^2$$

Усреднение двух измерений: $\theta_{к-экс} = 0,0377 кг \cdot м^2$
Погрешности:

$$\varepsilon_{к}^{p-э} = 10,23\%$$

$$\varepsilon_{к}^{э-3D} = 2,44\%$$

Экспериментальное определение момента инерции маховика проведен аналогично коленчатому валу. Масса маховика $M_{мах} = 48,3 кг$
Момент инерции [3]:



Рис. 8 – подвесы коленчатого вала и маховика

$$\theta_{мах-экс} = \frac{M_{мах} g a b T_{мах}^2}{4 \pi^2 l}, кг \cdot м^2 \quad (45)$$

где: $g = 9,81 м/с^2$ – ускорение свободного падения; a и b – расстояние между двумя тросами в нижнем и верхнем местах закрепления, m ; l – расстояние от нижней точки крепления до балки.

$$\theta_{мах-экс1} = 0,962 кг \cdot м^2$$

$$\theta_{мах-экс2} = 0,878 кг \cdot м^2$$

Усреднение двух измерений: $\theta_{мах-экс} = 0,0377 кг \cdot м^2$

Погрешности:

$$\varepsilon_{мах}^{э-э} = 9,96\%$$

$$\varepsilon_{мах}^{3D-э} = 8,52\%$$

Принятые значения податливостей и моментов инерции основных элементов крутильной системы исследуемого ДГ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Принятые податливости и моменты инерции масс основных элементов крутильной системы ДГ-8,83 в качестве окончательных исходных данных

Элемент крутильной системы		Коленчатый вал	Маховик	Ротор генератора	Жесткое соединение
$e, Н^{-1} \cdot м^{-1}$	Аналитический метод	$9,03 \times 10^{-6}$	$7,62 \times 10^{-10}$	$2,196 \times 10^{-6}$	$2,55 \times 10^{-6}$
$\theta, кг \cdot м^2$	Аналитический метод	-	-	0,176	0,0006
	Экспериментальный метод	0,0377	0,925	-	-

Заклучение

Таким образом в качестве исходных данных для аналитических и экспериментальных исследований крутильных колебаний дизель-генератора ДГ-8,83 выбираем значения, представленные в итоговой табл. 3.

На базе выбранных исходных данных авторы намерены приступить к расчету крутильных

колебаний с жестким и упругим соединением дизеля с генератором.

Для обеспечения точности аналитических и экспериментальных исследований крутильных колебаний других дизельных установок авторы рекомендуют прежде всего подготовки обоснованных исходных данных.

Литература

1. Румб, В. К. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов / – СПб: СПбГМТУ, 2008. 298 с.
2. Уицкер Й.Й., Ир Г.Р., Шиглеы Й.Е. Теория машин и механизмов. Нью-Йорк: Изд-во Оксфордского университета, 2016. 950с.
3. Асллан Х., Вероника Х. Определению моментов инерции деталей сложной формы // Международный журнал фундаментальных и прикладных наук. 2012. № 6. С. 241-244.
4. Торы Ф, Чарлес Х. Предотвращение проблем с крутильной вибрацией в поршневых машинах // Техасский Университет А&М. Лаборатории Турбомашинного Оборудования. 2009. С. 213-238.
5. Яманин, А.И. Жаров А.В. Динамика поршневых двигателей / Москва: Машиностроение, 2003. 464 с.
6. Терских, В. П. Расчеты крутильных колебаний силовых установок.: справочное пособие. Ленинград: Судостроение, 1953. 258 с.

References

1. Rumb, V. K. Konstruirovaniye i raschety prochnosti sudovykh valoprovodov [Designing and calculating the strength of ship's shaft lines] / – SPb: SPbGMTU, 2008. 298 s.
2. Uicker J.J., Jr G.R., Shigley J.E. Teoriya mashin i mehanizmov. N'ju-Jork: Izd-vo Oksfordskogo universiteta, . [Theory of Machines and Mechanisms, 5th ed.] 2016. 950s.
3. Asllan H., Veronika H. Opredeleniyu momentov inercii detalej slozhnoy formy [Case study on determination of inertia moments of details with complex shapes]// Mezhdunarodnyy zhurnal fundamental'nyh i prikladnyh nauk. 2012. № 6. S. 241-244
4. Tory F, Charles H. Predotvrashhenie problem s krutil'noy vibraciej v porshnevyyh mashinah [Prevention of torsional vibration problems in reciprocating machinery] // Tehasskij Universitet A&M. Laboratorii Turbomashinnogo Oborudovaniya. 2009. S. 213-238.
5. Jamanin, A. I., Zharov A.V. Dinamika porshnevyyh dvigatelej : uchebnoe posobie [Dynamics of piston engines] / Moskva: Mashinostroenie, 2003. 464 s.
6. Terskih, V. P. Raschety krutil'nyh kolebanij silovykh ustanovok.: spravochnoe posobie. [The calculations of torsional vibrations of the power plant]. Leningrad: Sudostroenie, 1953. 258 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Цзюньцзе Цзэн, аспирант, кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: tzeng817@gmail.com

Армен Минасович Минасян, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, 198262, Санкт-Петербург, пр. Ленинский, 101, e-mail: mamsar@mail.ru

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

Junjie Zeng, graduate student, Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: tzeng817@gmail.com

Armen M. Minasyan, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of computer engineering and information technology, Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: mamsar@mail.ru

УДК 621.181.27
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.053

Анализ степени снижения конструктивного коэффициента энергетической эффективности судов гражданского флота при применении утилизационных паротурбинных установок

В.В. Медведев¹, Р.О. Голубев¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Интенсивное совершенствование энергетики новейших судов гражданского флота требует актуализации информации по утилизационным возможностям паротурбогенераторов, работающих на ресурсе утилизации теплоты отработавших газов судовых главных двигателей и позволяющих существенно повысить энергетическую эффективность установки. Повышение энергетической эффективности востребовано сегодня как по экономическим, так и по экологическим соображениям.

В качестве основного критерия степени повышения энергетической эффективности судов новейших проектов при применении паротурбогенераторов был принят конструктивный коэффициент энергетической эффективности (ККЭЭ). Как основной инструмент для проведения расчётов использовалась программа для ЭВМ, предназначенная для выполнения проектного расчёта судового утилизационного водотрубного котла с пароперегревателем. Расчёты выполнялись для трёх типов судов: балкеров, СПГ-танкеров и контейнеровозов. Подтверждена эффективность применения паротурбогенераторов для обеспечения соответствия требованиям по ККЭЭ. Показана зависимость эффективности его применения от типа судового главного двигателя и архитектуры энергетической установки в целом. Наибольшая мощность турбогенераторов была получена для СПГ-танкеров с единой электроэнергетической системой и для контейнеровозов с короткоходовыми главными малооборотными двигателями.

Ключевые слова: балкер; конструктивный коэффициент энергетической эффективности; контейнеровоз; система глубокой утилизации теплоты; отработавшие газы; паротурбогенератор; СПГ-танкер; судовая энергетическая установка; утилизационный котёл.

Analysis of the energy efficiency design index reduction by steam turbine based waste heat recovery systems application for civil vessels

Valery V. Medvedev¹, Roman O. Golubev¹

¹St. Petersburg state marine technical University

Abstract. In terms of intensive development of energy solutions for civil vessels the revision of characteristics of auxiliary steam turbine generator sets utilizing main engines' exhaust gases, which provide significant energy efficiency growth for marine power plants, becomes very important. The energy efficiency improvement is currently essential because of the ecological and economical concerns.

The energy efficiency design index (EEDI) was accepted as a main criterion of the energy efficiency improvement for the modern ship projects equipped with steam turbine generator sets. The computer program created for the superheated steam producing exhaust gas boilers design was used as a main tool in the proceeded calculations. The results were received for three ship types: bulk carriers; LNG carriers and container ships.

The steam turbine generator sets application was confirmed to be an efficient method of keeping pace with EEDI requirements. The dependence of the turbine generator's performance from a main engine type and a whole power plant's architecture was demonstrated. The explored generators of LNG carriers with integrated electric propulsion and of container ships with short stroke slow speed main engines could provide the highest electricity production level.

Keywords: bulk carrier; energy efficiency design index; container ship; waste heat recovery system; exhaust gas; steam turbine generator set; LNG carrier; marine power plant; exhaust gas boiler.

Введение

Необходимость сокращения экономических издержек при транспортировке грузов морем была и остаётся основным драйвером развития судостроительной индустрии и судовой энергетики, в частности. Как известно, экономическая сообразность владения транспортными судами, которых в гражданском флоте преобладающее большинство, складывается из ряда комплексных показателей, таких как: первоначальная стоимость судна и его энергетической установки (СЭУ); текущие расходы за рейс (на топливо, смазку, текущий ремонт,...); доход от выполнения объёма транспортной работы и т.д. Модели анализа экономической эффективности проектов судов на сегодняшний день чётко сформулированы и глубоко проработаны [1, 2, 3].

Очевидно, что модель экономического анализа комплексна, и одно лишь совершенствование энергетической установки неспособно перекрыть влияние на модель прочих факторов. Поэтому в развитии судовой энергетики наблюдается значительная степень консервативности. Например, в СССР на гражданском флоте утилизационные турбогенераторные установки стали применяться с 1966 г., а ровно 50 лет назад, в 1970 г., в эксплуатацию вводится первый буксир-толчок типа «Маршал Блюхер», который становится первым судном внутреннего плавания с системой глубокой утилизации теплоты (СГУТ). Буксир был оснащён утилизационным котлом КУП 135/5 паропроизводительностью 1900 кг/ч при давлении 0,49 МПа. Большая часть вырабатываемого пара направлялась на утилизационный паротурбогенератор (УПТГ) мощностью 100 кВт,

который был должен полностью замещать дизель-генератор аналогичной мощности [4, 5]. Несмотря на более чем полувековой опыт применения СГУТ, проекты судов с такими системами остаются единичными. Поскольку, помимо высокой энергетической эффективности, СЭУ должна обладать такими неотъемлемыми качествами как: малая масса и габариты; высочайшая надёжность; высокий уровень автоматизации; технологичность; маневренность и т.д. Оптимальность экономической модели определяется балансом между энергетической эффективностью и всеми перечисленными и прочими качествами.

Тем не менее стоит помнить, что значимость каждого из выбираемых критериев исторически изменчива. В наши дни потребность в высокой энергетической эффективности экстремально возросла по экологическим соображениям. Воплощением этого требования, как известно, стал конструктивный коэффициент энергетической эффективности (ККЭЭ, англ. EEDI), внедрённый ИМО (англ. IMO) как средство кардинального повышения экологичности морского транспортного флота [6]. Например, от судов новейшей постройки к 2025 г. будет по данному критерию требоваться экологичность на 30% выше, чем в 2014 г., а фирмой MAN D&T, являющейся одним из крупнейших производителей судового энергетического оборудования, прогнозируется и дальнейшее ужесточение требований по ККЭЭ (дополнительное снижение референтной линии на 10%) [7]. Новый критерий по праву может называться технико-экологическим, поскольку он не преследует цели непосредственно повысить энергетическую эффективность проектов судов – расчётная формула ККЭЭ допускает и тривиальное снижение мореходных качеств проекта в угоду повышению экологичности. Как будет показано далее, ряд судовладельцев уже прибегнул к этой вынужденной мере.

В связи с новыми требованиями, за прошедшие несколько лет отношение к средствам повышения энергетической эффективности судов существенно изменилось. Если ранее подчёркивались такие негативные качества СГУТ как усложнение функциональной схемы СЭУ и снижение её надёжности, то теперь, помимо прочих способов повышения энергетической эффективности, всерьёз рассматриваются варианты глубокой утилизации теплоты с применением не только воды, но и низкокипящих органических теплоносителей по т. н. органическому циклу Ренкина с давлением в питательной системе порядка 4,5 МПа [8, 9].

Расчётная схема утилизационного котельного агрегата

В данной работе анализируется возможное повышение энергетической эффективности СЭУ судов новейших проектов посредством применения УПТГ. Как следует из предыдущего раздела, сама идея использования в составе энергетического комплекса утилизационных турбин не нова, но совершенствование проектов судов гражданского флота – их главных двигателей (ГД), главных передач мощности, перераспределение общесудовых потребностей в энергии (тепловой и электрической), изменение внешних факторов (в

первую очередь экологического) и т.д. – требует актуализации информации по реализуемому в УПТГ ресурсу утилизации.

Помимо УПТГ аналогичную функцию преобразования теплоты отработавших газов (ОГ) в электроэнергию могут обеспечивать, например, утилизационные газотурбогенераторы. Применение именно УПТГ обеспечивает следующие важнейшие преимущества СЭУ:

1. Не происходит сокращения мощности турбины вследствие засорения проточной части, т.к. рабочая среда (пар) турбины является промежуточной и имеет значительно большую степень чистоты, чем ОГ;

2. Даже при недостаточности ресурса утилизации ОГ для генерации перегретого пара (ПП) и, следовательно, электроэнергии в необходимом количестве, недостающий объём пара может вырабатываться вспомогательным котлом, что позволяет избежать параллельной работы турбогенератора с дизель-генератором и экономить ресурс последнего;

3. Котельная установка обладает высокой аккумуляционной способностью, т.е. работа УПТГ может продолжаться некоторое время после останова главного двигателя (около 5 минут), что обеспечивает нормальный перевод нагрузки на дизель-генератор.

Расчёты для данной работы были выполнены в программе для ЭВМ: «Программа проектного расчёта судового утилизационного водотрубного котла с пароперегревателем», позволяющей производить тепловой, гидравлический, газодинамический и компоновочный расчёты котла, а также прогнозировать мощность УПТГ [10]. Применение программы даёт возможность оценить внутреннюю реализуемость теплоперепада ОГ в системе утилизации. Т.е., помимо значений мощности УПТГ, программа позволяет контролировать такие параметры как: масса и габариты котла; сопотливление, создаваемое элементами котла в газоходе; температуры и скорости сред в трубных пучках котла; эффективность использования их площади теплообмена; тепловой КПД УК и т.д. От каждого из перечисленных параметров непосредственно зависит работоспособность системы, и лишь их оптимальная комбинация может обеспечить эффективный процесс передачи теплоты ОГ рабочей среде с последующей генерацией необходимого количества механической, электрической и тепловой энергии.

На рис. 1 приведена расчётная функциональная схема утилизационного котельного агрегата (УКА). Она соответствует типовой принципиальной схеме установки с глубокой утилизацией теплоты, описанной, например, в [11] и интегрируема в неё.

Схема предполагает одну ступень генерации насыщенного пара с температурой 165°C и давлением 0,7 МПа. Теплота от ОГ отводится в газоходе УК 1 трубными пучками экономайзера 2, испарителя 3 и перегревателя 4. Испарение воды в котле происходит в процессе её многократной циркуляции между сепаратором пара 5 и участками экономайзера и испарителя. Циркуляция является принудительной и обеспечивается циркуляционным насосом 6.

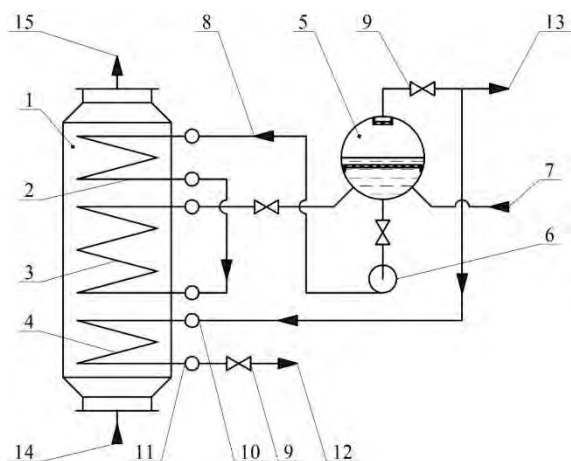


Рис. 1. Функциональная схема утилизационного котельного агрегата

Питательная вода (ПВ) 7 подаётся в сепаратор пара, где смешивается с паровой водой и повышает свою температуру перед поступлением в экономайзер (ТВХ) 8 в соответствии с формулой:

$$t_{\text{вх}} = t_s - \frac{t_s - t_{\text{ПВ}}}{K}, \quad (1)$$

где t_s – температура насыщения; $t_{\text{ПВ}}$ – температура ПВ на входе в сепаратор; K – кратность циркуляции, поддерживаемая в котельной установке.

Температуре ПВ как одному из важнейших параметров, вводимых в программу, было уделено особое внимание. Для её корректного определения были изучены схемы систем водяного охлаждения фирм-производителей главных двигателей. Температура ПВ устанавливалась таким образом, чтобы минимизировать или полностью исключить изменения в этих исходных схемах. Так для схем с малооборотными двигателями (МОД), которые могут быть рассмотрены на примере весьма востребованного сегодня двигателя MAN B&W S70ME-C8.2-II с центральным водяным охлаждением, возможность регенеративного подогрева воды от схемы отсутствует [12]. В схеме вода, отводящая тепло от элементов ГД, на входе в центральный водяной охладитель имеет температуру порядка 60°C; после смешения в теплообменнике конденсата от УПТГ и от общесудовых потребителей ПВ имеет такую же, если не большую, температуру. С другой стороны, производителями среднеоборотных двигателей (СОД) предусматриваются и отдельные контуры высоко- и низкотемпературного охлаждения. Например, в этом случае для двигателей Wärtsilä 50DF охлаждающая вода высокотемпературного контура, после отвода теплоты от цилиндров ГД и высокотемпературного воздухоохлаждателя, имеет температуру порядка 94°C, что обеспечивает возможность дополнительного подогрева ПВ, поступающей в УКА [13].

Таким образом, в расчётах для МОД $t_{\text{ПВ}}$ была принята равной 330 K, для СОД – 360 K. Следовательно, в соответствии с формулой (1), в экономайзере вода поступает с температурой соответственно 402 K (129°C) и 412 K (139°C).

Большая температура ПВ может снижать тепловой КПД УКА, но уменьшает размеры

экономайзера, что особенно важно для многомашинных СЭУ с СОД, которые могут быть оснащены несколькими УКА.

Температура отработавших газов на входе в УКА 14 (см. рис. 1) также принималась по данным фирм-производителей ГД для конкретных судов.

Влияние компоновки котла на степень полноты реализации ресурса утилизации

Возможности программы [10] по формированию архитектуры газохода котла на основании максимального реализуемого теплоперепада ОГ, который может быть утилизирован, позволяют установить мощность УПТГ с обеспечением передачи некоторого объёма теплоты от газов ГД к рабочей среде СГУТ. Мощность УПТГ определяется в условиях соблюдения задаваемого ограничения по сопротивлению УКА и при сохранении в допустимых пределах параметров сред в трубных пучках: воды в экономайзере; пароводяной смеси в испарителе и перегретого пара в перегревателе.

Расчёты выполнялись при следующих значениях параметров, определяющих компоновку котла:

1. Трубы, используемые в трубных пучках: экономайзер и испаритель – 22x2,5 мм; перегреватель – 29x2,5 мм. Размеры труб подбирались в соответствии с данными по компоновке типоразмеров УКА, изложенными в [14]. В ряде случаев, для сохранения характеристик сред в заданных диапазонах, применялись трубы, отличные от заявленных (22x2,5 мм в перегревателе).

2. Если для испарителя и перегревателя были применены одноходовые змеевики (один ход в плоскости поперечного сечения газохода), то для экономайзера они были приняты трёхходовыми. Это означает, что, в условиях постоянства поперечного сечения газохода, суммарное сечение труб в одном ходе для экономайзера в три раза меньше, чем для испарителя. Такое решение обусловлено значительно большей плотностью ПВ в экономайзере. Оно позволяет уменьшить вертикальный габарит экономайзера, а, следовательно, и всего котла, и выдержать требование по скорости для ПВ в трубах;

3. Все трубные пучки котла были выбраны шахматного типа, что также позволило сократить вертикальный габарит котла. С другой стороны, из графиков и эмпирических зависимостей, приведённых в [15], следует, что, в сравнении с коридорными пучками, шахматные, при прочих равных условиях, не дают значительного прироста сопротивления УКА по газовой стороне;

4. Приблизительное соотношение сторон котла было принято равным 1,5 (точное значение определяется программой). Отклонением от квадратной формы уменьшается угол раскрытия диффузора и конфузора УКА, что позволяет уменьшить сопротивление по ОГ. При этом прирост сопротивления из-за резких изменений площади поперечного сечения после диффузора и перед конфузуром незначителен (рис. 2 и 3);

5. Количество секций трубных пучков определялось в несколько приближений;

5.1. Изначально для всех случаев УКА принимался односекционным. Визуализация расчёта из программы [10] для односекционного УКА приведена на рис. 2. Результаты, представленные на

рис. 2, были получены для УК, работающего на базе среднеоборотного ГД. Для односекционного УК соотношение сторон котла соответствует соотношению сторон секции;

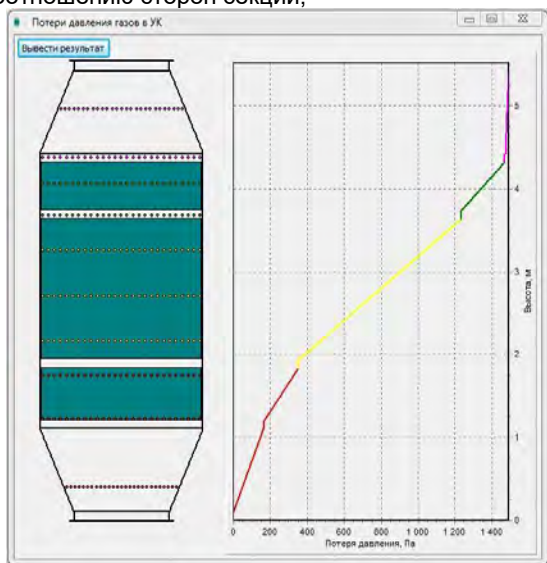


Рис. 2. Потери давления ОГ в односекционном УК

5.2. Применение МОД создаёт сложности в использовании односекционной компоновки, ввиду больших значений коэффициента избытка воздуха двигателей этого типа. Увеличивающийся расход ОГ высокомоощных МОД означает потенциально большую паропроизводительность УК. С ростом

паропроизводительности скорости пароводяной смеси в экономайзере и перегретого пара в перегревателе могут выходить из допустимых диапазонов. В этом случае программа идёт на увеличение числа рядов труб и, следовательно, ширины газохода. В конечном счёте это приводит к значительному увеличению угла раскрытия диффузора и конфузора и росту потерь давления ОГ в них (их высота в программе принята постоянной). Для сохранения сопротивления УК ниже задаваемого уровня программа уменьшает реализуемый в УК тепलोперепад ОГ, т.е. сокращает расстояние, проходимое ОГ в межтрубном пространстве, и потерю давления в нём. Происходит неудачное перераспределение потерь давления ОГ между межтрубным пространством и прочими местными сопротивлениями, с неизбежной потерей мощности УПТГ. Поэтому, при фиксации значительных возрастных температур ОГ на выходе из УК 15 (см. рис. 1), выполнялись расчёты для двухсекционного УК. Пример результатов такого расчёта приведён на рис. 3. На рисунке испаритель и перегреватель – двухсекционные, экономайзер – односекционный. Увеличение числа параллельных секций позволяет, в конечном счёте, повысить реализуемый в СГУТ ресурс утилизации ОГ. Например, УК на рис. 3 обеспечивает СЭУ 1,3 кг/с насыщенного пара (задаётся как исходный параметр) и мощность УПТГ 5320 кВт, при температуре ОГ на выходе из УК 168°C. Аналогичный односекционный УК обеспечивает мощность УПТГ 3020 кВт, при температуре ОГ на выходе из УК 249°C.

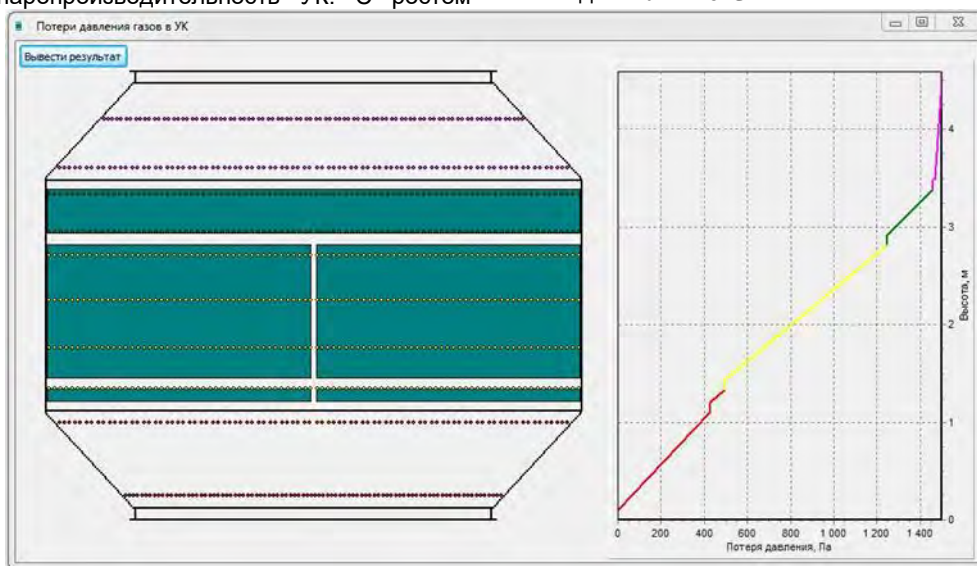


Рис. 3. Потери давления ОГ в двухсекционном УК

В двухсекционном УК соотношение сторон секции будет в два раза больше, чем соотношение сторон корпуса. Увеличение высоты двухсекционного УК приводит к большим потерям давления ОГ в межтрубном пространстве, но они компенсируются уменьшением угла раскрытия диффузора и конфузора при сокращении площади поперечного сечения газохода.

Определяемая программой форма трубных пучков (количество рядов труб по высоте и глубине, продольный, поперечный и диагональный шаг) влияет не только на сопротивление по газовой

стороне, но и на энтальпию ПП на входе в турбину 12 (см. рис. 1). Во-первых, потому что программа определяет температуру ПП, зависящую от сопротивления по стороне ОГ, которое может приходиться на трубный пучок перегревателя. С изменением температуры изменяется и производительность по ПП. Во-вторых, конфигурацией УКА определяется потеря давления ПП на пути от сепаратора к турбине. Например, в соответствии с рис. 1, помимо сопротивления трения и местных сопротивлений погибов труб, происходит потеря давления ПП в сепарационном щите

сепаратора, при выходе из сепаратора, в арматуре 9, в раздающем 10 и собирающем 11 коллекторах перегревателя.

В итоге, расчётными значениями производительности по перегретому пару ($D_{пт}$) и его энтальпии (i_0) будет определяться прогнозируемая мощность УПТГ:

$$P_{УПТГ} = D_{пт} (i_0 - i_k) \eta_{0i} \eta_M \eta_P \eta_G, \quad (2)$$

где i_k – энтальпия пара на выходе из турбины; η_{0i} и η_M – соответственно её относительный внутренний и механический КПД; η_P – КПД редуктора; η_G – КПД электрогенератора.

Расчёт повышения энергетической эффективности

В работе были проведены расчёты на предмет повышения ККЭЭ посредством применения УПТГ для новейших судов трёх типов: балкеров, СПГ-танкеров и контейнеровозов, на основании характеристик проектов, приведённых в [16]. Результаты расчётов в графической форме приведены на рис. 4.

В дополнение к исходным данным для расчётов, обоснованным в предыдущих разделах, в программу вводились следующие параметры:

1. Расчётная мощность ГД – по [16];
2. Суммарный коэффициент избытка воздуха ГД: 2,4 для СОД и 3,4 для МОД;
3. Влажность воздуха – 0,01 кг/кг;
4. Температура отработавших газов ГД – по данным фирм-производителей;

5. Удельный расход топлива (дизельного, газового) – по данным фирм-производителей;

6. Общесудовая потребность в насыщенном паре принималась как 85% от производительности котельной установки из [16].

7. Предельное сопротивление УК – за начальное значение в расчётах было принято 1500 Па с повышением значения при невозможности расчёта.

Важной особенностью всех трёх рассматриваемых типов судов является отсутствие специальных потребителей пара, способных сократить мощность УПТГ на ходовом режиме. СПГ-танкеры могут оснащаться регазификационными установками, но регазификация на борту судна производится на стоянке.

Расчёты для СЭУ с МОД выполнялись с учётом возможного повышения температуры ОГ перед УК (на 50°C) за счёт байпасирования турбоагрегата по технологии, описанной в [8]. Увеличение расхода топлива при этом не учитывалось, т.к. оно находится в пределах погрешности, заявленной фирмой-производителем ГД.

Наименьший эффект от применения УПТГ был получен для балкеров – в среднем утилизационная турбина позволяла сократить ККЭЭ на 5,5%. КПД СЭУ в среднем возрастает с 47% до 49,5%. Этот результат объясним низкой скоростью хода судов, перевозящих груз навалом – 14-16 уз. На них необходимый упор гребному винту обеспечивают длинноходовые и сверхдлинноходовые МОД сравнительно малой мощности и обладающие удельно меньшим ресурсом утилизации.

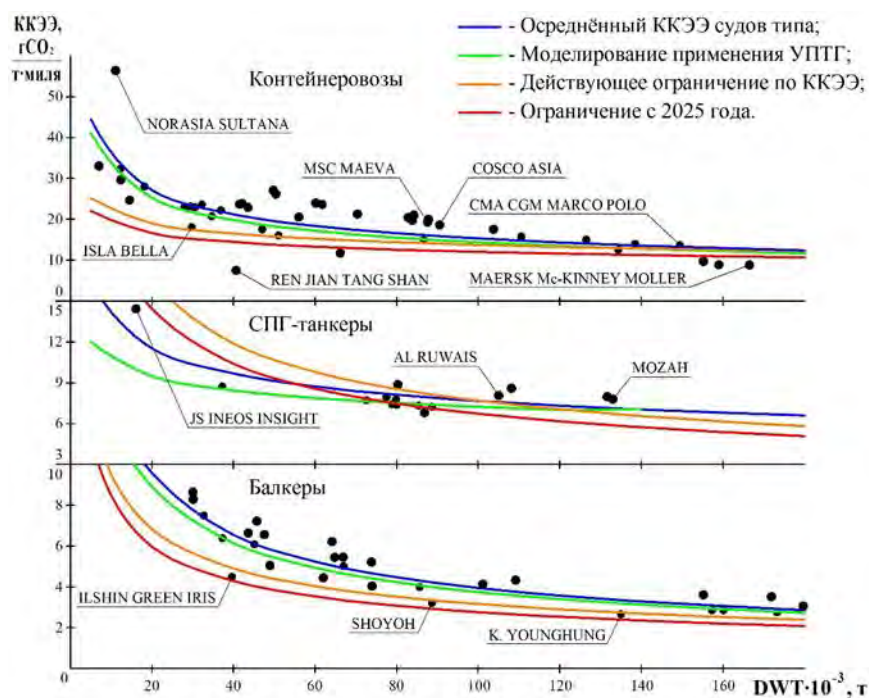


Рис. 4. Снижение ККЭЭ судов при применении УПТГ

В большинстве случаев, мощности УПТГ достаточно для полного замещения дизель-генераторов. В соответствии с рис. 4, новейшие балкеры соответствуют существующим требованиям по ККЭЭ, а применение на них УПТГ обеспечит соответствие требованиям и на следующем этапе снижения референтной линии. Например, на балкере

«SHOYOH», введённом в эксплуатацию в 2013 г. высокая энергетическая эффективность обеспечивается применением валогенератора, а его замещение турбогенератором способно обеспечить снижение ККЭЭ дополнительно на 3,2%. Судно «K. YOUNGHUNG» (2015 г.) показывает высокий результат по значению ККЭЭ за счёт применения

ультрадлиноходового малооборотного двигателя фирмы MAN B&W (серии G). Балкер «ILSHIN GREEN IRIS» (2017 г.) воплощает в себе качественно новый подход к повышению энергетической эффективности – его МОД серии G способен работать на природном газе (G1 концепт).

Если на прочих типах судов применение природного газа в качестве топлива ГД рассматривается как передовая технология, то для СПГ-танкеров она вполне обыденна, поскольку для судов этого типа всегда приходилось решать проблему утилизации испарений сжиженного природного газа, транспортируемого на борту. Сегодня СЭУ большинства судов этого типа работают именно на природном газе. В работе были выполнены расчёты для СПГ-танкеров, СЭУ которых оснащены двигателями внутреннего сгорания. В большинстве своём это СОД, работающие в составе единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС), т.е. обеспечивающие электроэнергией как главных, так и вспомогательных судовых потребителей. На рис. 4 они расположены в средней части графика и, как видно из рисунка, большинство из них соответствует как нынешним, так и будущим требованиям по ККЭЭ. По расчётам, среднее снижение ККЭЭ при применении УПТГ на СПГ-танкерах с ЕЭЭС составляет 8,8%; КПД СЭУ при этом возрастает с 44% до 48,2%. Значительный ресурс утилизации обусловлен температурой ОГ двухтопливных СОД, превышающей 400°C. УПТГ способны обеспечить электроэнергией не только вспомогательных

$$N_{УПТГ} = -1,06 \cdot 10^{-13} W^3 + 7 \cdot 10^{-8} W^2 - 1,23 \cdot 10^{-2} W + 1341,9. \quad (3)$$

Наибольшим ресурсом утилизации ОГ, в абсолютных единицах, из рассматриваемых типов судов, обладают контейнеровозы, являющиеся одними из самых быстроходных гражданских судов. Их эксплуатационная скорость хода может превышать 25 уз. В одновальных пропульсивных установках с ограниченным диаметром гребного винта повышенная скорость хода обеспечивается увеличением частоты вращения движителя, который приводится напрямую короткоходовым МОД. Такие МОД обладают повышенным ресурсом утилизации ОГ. Для двигателей RTA фирмы Wärtsilä (Sulzer) он несколько выше, например, ГД 12RTA96C-B контейнеровоза «MSC MAEVA» (2005 г.) мощностью 68,64 МВт на номинальном режиме обеспечивает температуру ОГ 314°C (на основе этого судна были получены результаты на рис. 3); в то время как двигатель аналогичной мощности MAN B&W 12K98ME, подобный установленному на судне «MSC IVANA» (2008 г.), будет иметь температуру ОГ за турбонагнетателем не более 284°C. Наибольшая полученная мощность УПТГ в расчётах составила 6240 кВт, она была получена для судна «CMA CGM MARCO POLO» (2012 г.), также оснащённого МОД Wärtsilä эксплуатационной мощностью 72 МВт. Отдельного внимания заслуживает фидерный контейнеровоз «NORASIA SULTANA» (1999г.), дословно определяемый как контейнеровоз-фрегат. Судно имеет эксплуатационную скорость хода 25,1 уз, обеспечиваемую дизель-редукторной установкой с двумя среднеоборотными двигателями Sulzer 16ZAV40S пропульсивной мощностью 19,8 МВт. Полученная мощность УПТГ – 1710 кВт (при температуре ОГ 407°C).

потребителей, но и направить порядка 1 МВт мощности к гребным электродвигателям. СОД на СПГ-танкерах применяются и в составе пропульсивных установок с редукторной передачей мощности. Например, на судне «JS INEOS INSIGHT» (2015 г.) мощность от двух двухтопливных двигателей Wärtsilä 6L50DF передаётся на винт регулируемого шага через суммирующий редуктор.

Меньшей энергетической эффективностью обладают СПГ-танкеры с дизельными МОД, классов Q-flex («AL RUWAIS», 2007 г.) и Q-max («MOZAN», 2008 г.). На этих судах применяется технология повторного сжижения природного газа [17]. Её крайняя энергозатратность – мощность установки повторного сжижения газа до 6 МВт и более – не позволяет применением УПТГ, работающих на ресурсе утилизации ОГ МОД, полностью обеспечить даже общесудовую потребность в электроэнергии.

Результаты расчётов для СПГ-танкеров с МОД хорошо согласовываются с аппроксимационной зависимостью (3) мощности УПТГ ($N_{УПТГ}$, кВт) от грузоместимости танкера (W , м³), полученной в работе [18] при обработке расчётных данных системы автоматизированного проектирования [19]. Отклонение от зависимости (3) происходит только в меньшую сторону и не превышает 13,5%. Основные причины возникновения погрешности – это различия исходных данных в расчётах и отсутствие учёта внутренних особенностей СГУТ в программе [19].

Несмотря на значительно большую мощность утилизационных турбин контейнеровозов, избыток мощности, который может быть передан на винт, у них не многим больше, чем у СПГ-танкеров. В формуле для расчета ККЭЭ мощность, потребная рефрижераторными контейнерами, не учитывается, поэтому в расчётах избыток мощности УПТГ условно принимался направленным на движитель.

На контейнеровозах с МОД применение УПТГ позволило в среднем снизить ККЭЭ на 6,3% при соответствующем увеличении КПД СЭУ с 47,6% до 50,2%.

С введением ограничений по ККЭЭ проекты контейнеровозов претерпели существенные изменения. Например, появились суда с твин-скеговой кормой («MAERSK Mc-KINNEY MOLLER», 2013 г.) и двухвальной пропульсивной установкой, в которой становится возможным применять МОД меньшей оборотности, снижая таким образом удельный расход топлива и ККЭЭ, но одновременно снижается и температура ОГ (в расчётах 290°C). В итоге для этого судна, при суммарной пропульсивной мощности в 48 МВт, была получена мощность УПТГ лишь в 2160 кВт. Другой тренд – это снижение скорости хода контейнеровозов. В большинстве случаев оно умерено, например, последнее судно имеет эксплуатационную скорость хода 21,8 уз вместо типичной скорости для контейнеровозов его класса в 24-25 уз. Существуют примеры и с более существенным снижением скорости, например, фидерный контейнеровоз «REN JIAN TANG SHAN» (2017 г.), оснащённый свехдлиноходовым МОД (MAN B&W 6S50ME), ходит с типичной для балкеров скоростью 14,5 уз, имея эксплуатационную

пропульсивную мощность в 6060 кВт, на которой в расчётах было получено 260 кВт мощности УПТГ. Большая энергетическая эффективность достигается и вводом в эксплуатацию контейнеровозов с двухтопливными двигателями («ISLA BELLA», 2014 г.).

Заключение

1. Установлено, что применение УПТГ совместно с другими передовыми инженерно-техническими решениями (оснащение СЭУ двухтопливными ГД, применение единой электроэнергетической системы, твин-скеговая форма кормы и т.д.) способно в полной мере обеспечить соответствие проектов судов требованиям по ККЭЭ;

2. Наилучших результатов по снижению ККЭЭ УПТГ позволяют достичь на СПГ-танкерах с ЕЭЭС и среднеоборотными главными двигателями, что обусловлено достаточно высокой температурой ОГ последних;

3. Применение самой ЕЭЭС также существенно упрощает процесс утилизации теплоты ОГ, т.к. электроэнергия от УПТГ может передаваться по электроэнергетической системе не только к вспомогательным и общесудовым потребителям, но и к двигателям судна. Если главная передача мощности механическая, то направление избыточной мощности УПТГ на гребной винт будет связано с дополнительным существенным усложнением системы;

4. Применение УПТГ в условиях многомашинной СЭУ СПГ-танкера требует наличия нескольких УКА, что приводит к нежелательному усложнению функциональной схемы, удорожанию СГУТ;

5. ККЭЭ как показатель не позволяет сравнивать энергетическую эффективность судов различных типов. С другой стороны, наибольшую энергетическую эффективность по показателю КПД СЭУ, из рассмотренных типов судов, УПТГ обеспечивают контейнеровозам. Во-первых, потому что в абсолютных величинах на судах этого типа ресурс утилизации ОГ максимален. Во-вторых, потому что энергия, затрачиваемая на работу рефрижераторных контейнеров, в формуле КПД СЭУ учитывается как полезная.

6. Наименьший эффект от применения СГУТ был достигнут на балкерах. Он вполне сопоставим с применением валогенераторов при значительно большей простоте и надёжности последних;

7. Мощность УПТГ зависит не только от ресурса утилизации ОГ, но и от схемы СГУТ. Например, применённая в работе расчётная схема – с включением сепаратора УКА в циркуляционный контур – с одной стороны, не допускает переохлаждения трубных пучков экономайзера, а, с другой стороны, не позволяет снизить температуру ОГ на выходе из УК, что весьма желательно при применении в составе СЭУ ГД, работающих только на природном газе.

Литература

1. Даниловский А.Г. Проектирование судовых энергетических установок на основе САПР. Учебное пособие. – СПб. Изд-во СПбГМТУ, 2014. – 140 с.
2. Даниловский А.Г. Автоматизированное проектирование судовых энергетических установок. Учебное пособие. – СПб. Изд-во СПбГМТУ, 2006. – 206 с.
3. Архипов Г.А., Даниловский А.Г. Учебно-исследовательская система автоматизированного проектирования судовых энергетических установок. Выбор главного двигателя для морского транспортного судна. Методические указания для курсового и дипломного проектирования. – СПб. Изд-во СПбГМТУ, 1999. – 80 с.
4. Селиверстов В.М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. – Л. Судостроение, 1973. – 256 с.
5. Зайцев И.А. Энергетические установки буксирных судов. – Л. Судостроение, 1972. – 184 с.
6. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships (Annex 5, Resolution MEPC.308(73), Adopted on 26 October 2018). 36 p.
7. Propulsion of 2,200 – 3,300 teu container vessels. MAN Energy solutions, Copenhagen, January 2019. – 20 p.
8. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, August 2014. – 32 p.
9. Grljušić M., Medica V., Radica G. Calculation of efficiencies of a ship power plant operating with waste heat recovery through combined heat and power production. Energies. – 2015. №8. – P. 4273-4299.
10. Голубев Р.О. Программа проектного расчёта судового утилизационного водотрубного котла с пароперегревателем. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020613317. М., 2020.
11. Румб В.К., Яковлев Г.В., Шаров Г.И., Медведев В.В., Минасян М.А. Судовые энергетические установки. Судовые дизельные энергетические установки: учебник. – СПб. Изд-во СПбГМТУ, 2007. – 622 с.
12. MAN B&W S70ME-C8.2-GI-TII, Project Guide, MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, February 2014.
13. WÄRTSILÄ 50DF, Product guide, Wärtsilä, Marine solutions, Vaasa, November 2016.
14. Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы. – Л. Судостроение, 1988. – 296 с.
15. Аэродинамический расчёт котельных установок (нормативный метод). Под ред. С.И. Мочана. – Л. Энергия, 1977. – 256 с.
16. Significant ships of 1997-2017. – London. The Royal Institution of Naval Architects, 1998-2018.
17. Gomez J.R. et al. On board LNG reliquefaction technology: a comparative study. Polish maritime research. – 2014. № 81 – P. 77–88.
18. Медведев В.В., Туркин И.И., Тихомиров Б.А., Голубев Р.О. Анализ целесообразности повышения энергетической эффективности СЭУ с двухтопливными МОД посредством систем глубокой утилизации теплоты // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. № 1(43), Т.1 – С. 88-95.
19. Голубев Р.О. Программа расчёта характеристик энергетической установки СПГ-танкера. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611761. М., 2019.

References

1. Danilovskiy A.G. Proektirovanie sudovyh energeticheskikh ustanovok na osnove SAPR. Uchebnoe posobie [Design of ship power plants based on CAD. Tutorial.]. – SPb. Izd-vo SPbGMTU, 2014. – 140 s.
2. Danilovskiy A.G. Avtomatizirovannoe proektirovanie sudovyh energeticheskikh ustanovok. Uchebnoe posobie [Automated design of ship power plants. Tutorial.]. – SPb. Izd-vo SPbGMTU, 2006. – 206 s.
3. Arkhipov G.A., Danilovskiy A.G. Uchebno-issledovatel'skaya sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya sudovyh energeticheskikh ustanovok. Vybor glavnogo dvigatelya dlya morskogo transportnogo sudna. Metodicheskie ukazaniya dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya [Educational research system of computer-aided design of ship power plants. Selection of the main engine for a marine transport vessel. Methodical instructions for term and diploma design]. – SPb. Izd-vo SPbGMTU, 1999. – 80 s.
4. Seliverstov V.M. Utilizatsiya tepla v sudovyh dizel'nykh ustanovkakh [Heat recovery in marine diesel plants]. – L. Sudostroenie, 1973. – 256 s.
5. Zajcev I.A. Energeticheskie ustanovki buksirnykh sudov [Power plants of towing vessels]. – L. Sudostroenie, 1972. – 184 s.
6. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships (Annex 5, Resolution MEPC.308(73), Adopted on 26 October 2018). 36 s.
7. Propulsion of 2,200 – 3,300 teu container vessels. MAN Energy solutions, Copenhagen, January 2019. – 20 s.
8. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, August 2014. – 32 s.
9. Grljušić M., Medica V., Radica G. Calculation of efficiencies of a ship power plant operating with waste heat recovery through combined heat and power production. Energies. – 2015. №8. – S. 4273-4299.
10. Golubev R.O. Programma proektnogo raschyota sudovogo utilizatsionnogo vodotrubnogo kotla s paroperegrevatelem [Project design program for a shipboard waste water boiler with a superheater]. Certificate on state registration of software product № 2020613317. M., 2020.
11. Rumb V.K., Yakovlev G.V., Sharov G.I., Medvedev V.V., Minasyan M.A. Sudovye energeticheskie ustanovki. Sudovye dizel'nye energeticheskie ustanovki: uchebnyk [Ship power plants. Marine diesel power plants: textbook]. – SPb. Izd-vo SPbGMTU, 2014. – 622 s.
12. MAN B&W S70ME-C8.2-GI-TII, Project Guide, MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, February 2014.
13. WÄRTSILÄ 50DF, Product guide, Wärtsilä, Marine solutions, Vaasa, November 2016.
14. Hryapchenkov A.S. Sudovye vspomogatel'nye i utilizatsionnye kotly [Ship auxiliary and recycling boilers]. – L. Sudostroenie, 1988. – 296 s.
15. Aerodinamicheskij raschyot kotel'nykh ustanovok (normativnyj metod) [Aerodynamic calculation of boiler plants (normative method)]. Edited by S.I. Mochan. – L. Energiya, 1977. – 256 s.
16. Significant ships of 1997-2017. – London. The Royal Institution of Naval Architects, 1998-2018.
17. Gomez J.R. et al. On board LNG reliquefaction technology: a comparative study. Polish maritime research. – 2014. № 81 – S. 77-88.
18. Medvedev V.V., Zhukov V.A., Turkin I.I., Golubev R.O. Analiz celesoobraznosti povysheniya energeticheskoy effektivnosti SEU s dvuhtoplivnymi MOD posredstvom sistem glubokoj utilizatsii teploty [Viability analysis of increasing energy efficiency of a dual-fuel slow-speed engine using a deep heat recovery system]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologi. – 2019. № 1(43), T.1 – S. 88-95.
19. Golubev R.O. Programma raschyota harakteristik energeticheskoy ustanovki SPG-tankera [Power plant calculation software for LNG carrier]. Certificate on state registration of software product № 2019611761. M., 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Викторович Медведев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: v_v_medvedev@mail.ru

Роман Олегович Голубев, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: swit.roma@mail.ru

Valery V. Medvedev, Dr. Sci. (Eng.), associate professor, professor of the department of marine combustion engine and diesel plant, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: v_v_medvedev@mail.ru

Roman O. Golubev, Ph.D student (Eng.), St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: swit.roma@mail.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 532.5:001.5

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.029

Исследование поля скоростей в кильватерном следе за счаленными судами

Е.Ю. Чебан¹, Д.В. Никущенко², О.В. Мартемьянова¹, Н.Е. Зотова¹

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, ² Санкт-Петербургский морской технический университет

Аннотация. В настоящей работе приведены результаты исследования полей скоростей, возникающие при обтекании потоком жидкости судов в счале в зависимости от формы корпуса судов, расстояния между ними и относительного смещения корпусов судов лабораторными, натурными и численными методами. Лабораторные эксперименты выполнялись с применением ADV-датчика. Натурные эксперименты проводились на акватории р. Волга с двумя танкерами. Для численного моделирования использовался программный комплекс FineMarine™. Выполненное сопоставление результатов измерений скорости потока различными методами, показало достаточную сходимость результатов. Получено, что для моделей судов с упрощенными обводами характер спутного потока жидкости существенно зависит от расстояния между моделями. Показано, что увеличение расстояния между судами может приводить к значительному увеличению скорости спутного течения в раннем следе за счаленными корпусами, но при относительном продольном смещении судов такой картины не наблюдается.

Ключевые слова: опытовый бассейн, модельный эксперимент, поле скоростей, ADV-датчик, вычислительная гидродинамика, бортовой счал судов

Research of velocity field in vessel's wake current from «side by side» mooring

Egor Yu. Cheban¹, Dmitry V. Nikuschenko², Olga V. Martmianova¹, Natalia E. Zotova¹

¹ Volga state university of water transport, ² St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. This work presents the results of the study of velocity fields that occur when a stream of fluid flows along "side by side" vessels' mooring, depending on the hull forms, the distance between them and the relative displacement of the hull by laboratory, full-sized and numerical methods. Laboratory experiments were performed using an ADV-sensor. Field experiments were conducted with two tankers in the water area of the river Volga. The FineMarine™ software package was used for numerical simulation. A correlation of the results of the flow velocity measurement by various methods showed sufficient convergence of the results. It was found that the cocurrent stream of fluid pattern for models of vessels with simplistic hull form depends heavily on the distance between the models. It is shown that an increase in the distance between the vessels can lead to a significant increase in the fluid velocity of the concurrent stream in the early wake of the hulls of vessels' mooring, but this picture is not observed with a relative longitudinal displacement of the vessels.

Keywords: towing test tank, experimental modeling, velocity fields, ADV-sensor, CFD, «side by side» vessel's mooring

Введение

Проблема ликвидации разливов нефти в условиях быстротекущих рек обусловлена сложными неустановившимися течениями, в том числе в волновых и кильватерных следах судов на ограниченном фарватере, например при выполнении погрузо-разгрузочных работ несколькими судами на рейдах. Сложные многофазные течения вблизи судов могут оказывать существенное влияние на выбор технологии локализации разлива и параметры оборудования для локализации и ликвидации разливов нефти [1], характеристики которого должны исключать унос нефти. Распространение нефти при разливе с судов в счале будет зависеть от движения нефтяного пятна, которое в свою очередь определяются полем скоростей в кормовой части, а, следовательно, размерами и формами корпусов судов [1-3]. Кроме того, информация о поле скоростей за судами в счале может использоваться при проектировании толкаемых и буксируемых составов, а также определении их гидродинамических характеристик при маневрировании на малых скоростях.

Как показано в работе [5], расположенные в непосредственной близости корпуса судов могут

существенно изменить структуру корабельного следа по сравнению с одиночным судном, что существенно проявляется в области ближнего кильватерного следа. Результаты экспериментальных исследований полей скоростей и растекания имитатора нефтепродуктов в опытовом бассейне для счала двух речных судов, приведены в работах [1-3]. В то же время роль неоднородных течений и поверхностных волн, около счаленных корпусов судов все еще исследованы недостаточно и для разработки математических моделей процессов растекания нефти при ее разливе в счале необходимы дополнительные исследования гидродинамики потоков при обтекании счала судов.

Экспериментальное исследование структуры потоков за моделями счаленных судов

Ранее были выполнены экспериментальные исследования полей скоростей течения и распространения имитатора нефтепродуктов в моделях счалов судов в опытовом бассейне [1-3]. В экспериментах использовались модели счалов из судов с различными формами и размерами корпусов: суда с упрощенными обводами (большинство несамходных речных бункеровщиков - заправщиков и перекачивающих станций), хорошообтекаемые

модели судов типа «Волго-Нефть», «Волго-Дон» и др.

Составляющие поля скоростей (V_x , V_y , V_z) измерялись с помощью акустического доплеровского velocиметра ADV (Sontek 16 MHz Acoustic Doppler Velosimeter), положение которого изменялось по трем координатам относительно моделей судов. Изменялась форма корпусов судов, расстояние между моделями, относительное смещение корпусов по длине и скорость потока.

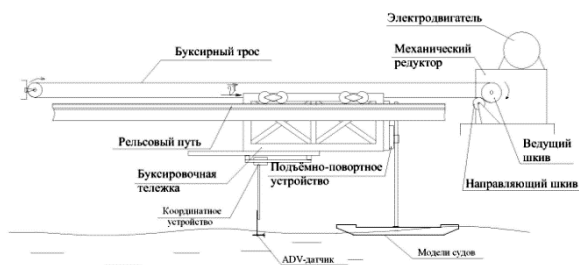


Рис. 1. Схема экспериментальной установки в опытном бассейне ВГУВТ

Некоторые результаты измерений полей скорости показаны на рис. 2, в виде графиков изменения продольных (2а) и поперечных (2б) составляющих скорости в случае счала из хорошо и плохо обтекаемого судов при расстоянии между корпусами судов (V_{MB}) 20 и 40 мм (1 и 2 м в натуральных условиях).

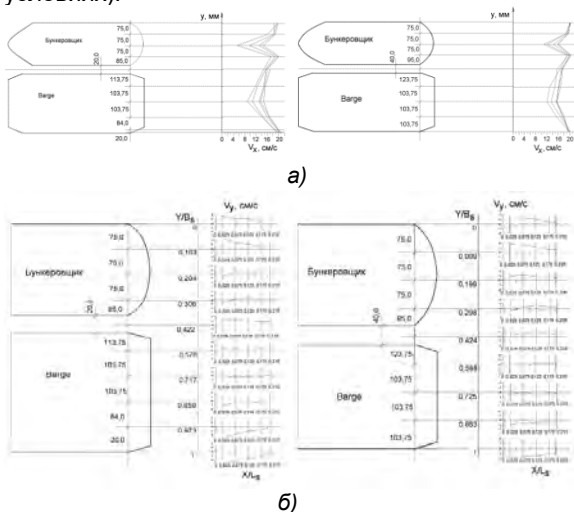


Рис. 2. Изменение продольных (а) и поперечных (б) составляющих скорости для счала из хорошо и плохо обтекаемого судов

Результаты измерений показали, что относительное смещение корпусов в продольном направлении существенно изменяет характер потока в кормовой части счала судов, например, профили скорости указывают на смещение потока в сторону удаленного корпуса. Для хорошо обтекаемых корпусов у смещенного корпуса происходит изменение знака профилей скорости, чего не наблюдается, например, у сочетания плохо и хорошо обтекаемого корпуса.

Анализ экспериментальных данных показал, что уменьшение расстояния между корпусами и скорости внешнего потока приводят к смещению потока в спутной струе за корпусом баржи (плохообтекаемого

судна). Например, замечено, что при скоростях 0,11 м/с и расстоянии $b=0,0265$ (20 мм или в реальных условиях скорость - 0,5 м/с, расстояние - 1,2 м), поток смещается к корме плохообтекаемого корпуса.

Для контроля воспроизводимости результатов, выполнялись измерения величины сопротивления движению моделей счалов (рис. 3,4).

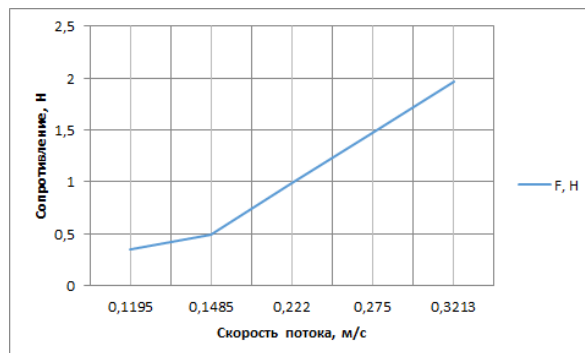


Рис. 3. График сопротивления модели счала, показанной на рис. 2

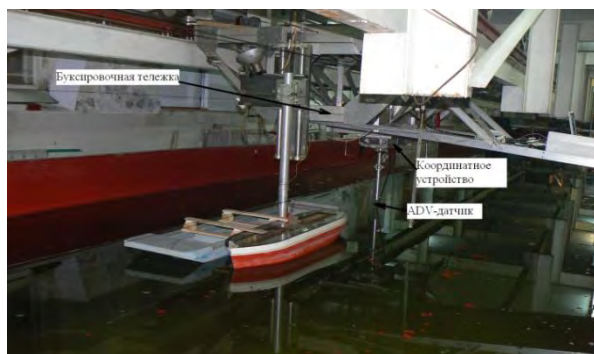


Рис. 4. Измерение полей скорости и сопротивления модели счала

Результаты лабораторных экспериментов показали, что влияние геометрии счала (расстояние между судами, продольное смещение, форма корпуса) сильнее всего проявляется в поперечной компоненте поля скорости обтекания. Для моделей судов без обводов характер спутного движения жидкости существенно зависит от расстояния между моделями. Увеличение расстояния между моделями с 20 и 40 мм, (натурное расстояние 1 и 2 м), может приводить к значительному повышению скорости спутного течения в раннем следе (отношение расстояния, пройденного моделью, к длине самой модели) за судами в счале. В то же время при относительном продольном смещении корпусов такой картины на ранних возрастах следов не наблюдается.

Натурные исследования потоков в кормовой части счала судов

Для верификации результатов экспериментов были выполнены натурные исследования полей скоростей течений за счалом судов на акватории р. Волга [4]. Измерения проводились для счала двух танкеров (проекты 765 т/х «СБ-643» и 866 т/х «Верный») на рейде нефтеналивных судов 917 км. р. Волга, Нижний Новгород. Расстояния между корпусами от 0,8 до 2,5 м. Суда были установлены на якорях и ориентированы вдоль руслового потока

носом против потока. Фоновая скорость течения реки на рейде составила 0,5-0,7 м/с. На рис.5 показана конфигурация счала на рейде и ход измерений полей скорости.

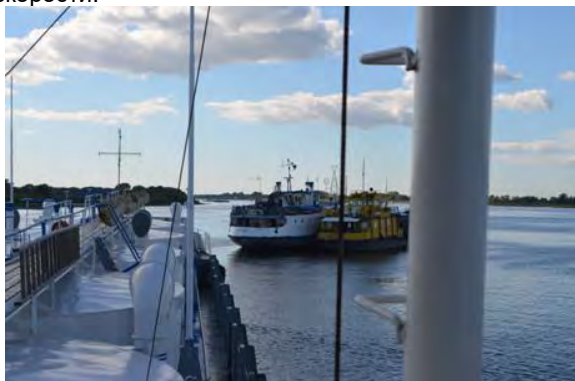


Рис. 5. Счал судов «СБ-643» и «Верный»

Методика проведения натуральных измерений состояла в последовательных пересечениях потока на моторной лодке с ADCP WorkHorse Sentinel 600 kHz и видеосъемке, в направлениях поперечных к потоку на различных расстояниях от кормы счала с регистрацией профилей трех компонент поля скоростей. Позиционирование лодки, с которой производились измерения, производилось: 1) по данным донного следа (bottom tracking) ADCP, и его магнитного компаса; 2) с использованием лазерного дальномера Cosmo 100; 3) по данным GPG приемника. Размер измерительной ячейки по глубине составлял 0.5 м, по горизонтали около 5 метров. Результаты измерений для нескольких отдельных пересечений приведены на рис. 6,7.

На рис. 6 приведены три характерных пересечения потока за счалом. Красной линией изображен трек лодки по донному следу акустического профилографа течений (ADCP), синими линиями – вектора средней скорости, измеренные в верхнем слое (начиная с глубины около 1 м от поверхности воды). На рис. 7 показаны профили вертикальной скорости в цветовом виде для контроля трехмерной структуры потока.



Рис. 6. Результаты измерений поля горизонтальных компонент скоростей течений за кормой счала.

Анализ результатов натуральных и лабораторных измерений показал подобие характерных структур потоков и ожидаемое уменьшение средней скорости

фоновому потоку за корпусами. Натурный эксперимент показал принципиальную возможность переноса результатов модельных экспериментов на реальные условия с учетом гидродинамического подобия потоков, а также возможность проверки сделанных выводов с использованием разработанной методики натурального эксперимента.

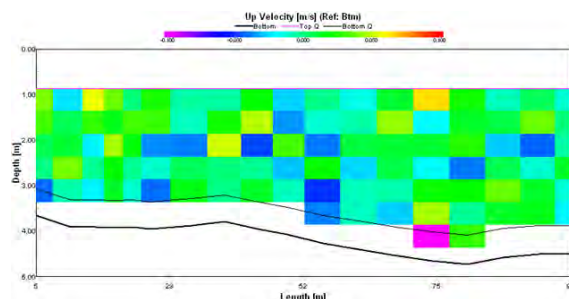


Рис. 7. Результаты измерений профилей вертикальной скорости потока, представленные в виде цветового контура, на первом разрезе за счалом (вертикальная ось – глубина, горизонтальная – расстояние).

Исследования потоков в кормовой части счала судов численными методами

Исследование гидродинамики потоков для счалов судов, как в лабораторных, так и в натуральных условиях обладают рядом существенных недостатков:

- необходимость изготовления большого числа моделей;
- значительное количество вариантов взаимного расположения корпусов судов;
- невозможность точного позиционирования датчиков относительно корпусов в бассейне;
- трудности с обеспечением необходимого количества взвешенных веществ в объеме опытового бассейна для работы ADV-датчика;
- невозможность точного учета гидрологических и гидрометеорологических условий при натуральных экспериментах.

Избежать этих недостатков можно при использовании численного моделирования на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD).

Численное моделирование потоков для счала судов выполнялось с помощью программного комплекса вычислительной гидродинамики FineMarine™.

С другой стороны, при численном моделировании полей скорости необходимо получить сходимость с экспериментом не только по интегральным характеристикам, т.е. сопротивлению, но и по значениям проекций скорости, что требует совершенно другого подхода к расчетной сетке и выбору моделей турбулентности. Для более точного разрешения потока было выполнено измельчение сетки в кормовой части потока, а также в области свободной поверхности. Поперечное сечение сетки показано на рис 8.

Результаты моделирования на нескольких сетках (табл. 1) показали, что наиболее близкие к экспериментальным, результаты, могут быть получены на сетках высокой плотности и K- ω SST модели турбулентности.

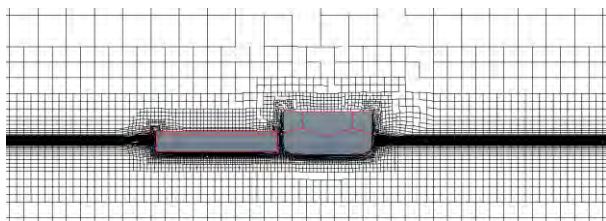


Рис. 8. Поперечное сечение сетки

При сравнении результатов было выяснено, что размеры расчетной области оказывают влияние на поле скоростей в кормовой части счала. В связи с этим размеры расчетной области при численном моделировании соответствовали размерам опытового бассейна шириной 4 м и глубиной воды 1,1 м.

Таблица 1

Сопроотивление модели счала при различных сетках и моделях турбулентности

	Скорость модели, м/с	Сила сопротивления, R_x , Н						
		Эксперимент	Сетка 1 2 665 117		Сетка 2 3 665 135		Сетка 3 12 333 999	
			DES SST	K- ω SST	DES SST	K- ω SST	DES SST	K- ω SST
1.	0.11	0.30	-	0.96	-0.449	-0.144	0,45	0,36
2.	0.22	0.97	0.256	1.9	0.125	0.033	0,77	1,047
3.	0.33	2.06	1.944	2.592	1.786	2.373	4,5	2,13

Значения составляющих скорости определялись в FineMarine™ соответственно координатной сетки, использованной для лабораторного эксперимента в опытовом бассейне. Пример сопоставления результатов эксперимента и численного моделирования для сечений 0,05 и 0,15 м показан на рис. 9. Результаты моделирования в виде распределения скорости в потоке показаны на рис. 10 для полной скорости и 11 для составляющей V_x .

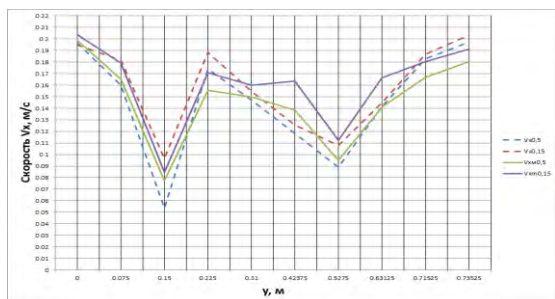


Рис. 9. Сравнение составляющих скорости V_x для двух сечений в потоке за кормой счала

Сравнение результатов показывает достаточную сходимость экспериментальных и численных данных. В то же время необходимо отметить, что разница в результатах наблюдается в нескольких характерных точках: в диаметральных плоскостях обоих судов в счале и точке напротив пространства между корпусами. Это может быть связано с недостаточной точностью позиционирования ADV-датчика и его измерительного объема относительно корпусов судов, а также с тем, что устойчивость показаний датчика зависит от содержания в воде твердых мелкодисперсных частиц. В то же время

использование ADV является предположительно наиболее точным методом измерения составляющих скорости в потоке за моделями судов в условиях опытового бассейна.

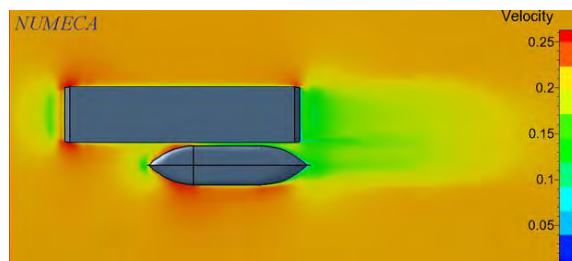


Рис. 9. Распределение скорости в потоке около счала судов

Для повышения точности численных расчетов необходимо использование при моделировании судов с реальными размерами, что связано в первую очередь с моделями турбулентности программных пакетов. Моделирование натуральных счалов судов будет выполнено на следующем этапе работы, т.к. требует значительных затрат машинного времени из-за сеток большой плотности.

Заключение

Выполнены исследования полей скоростей в кормовых частях судов в счалах лабораторными, численными методами, а также в натуральных экспериментах. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании оборудования по предупреждению и ликвидации разливов нефти, для определения гидродинамических характеристик толкаемых и буксируемых составов при маневрировании на малых скоростях.

Литература

1. Моделирование процесса растекания нефти при выполнении судами в счалах погрузо-разгрузочных операций (ПРО) / Чебан Е.Ю., Капустин И.А., Мольков А.А., Игоница М.В. // Речной транспорт (XXI век). 2015. – № 5 (76) – с.42-47.
2. Чебан Е.Ю. Экспериментальное исследование растекания нефтепродуктов в кильватерных следах судов в счале. / Чебан Е.Ю., Капустин И.А., Мольков А.А., Игоница М.В. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016, Т. 9. № 3. С. 57-65.
3. Моделирование растекания нефти в кильватерном следе судов. Постановка задачи и предварительные результаты. / Чебан Е.Ю., Капустин И.А., Мольков А.А., Игоница М.В. // Материалы 11-ой Международной конференция пользователей ANSYS/CADFEM», г. Москва, 14-16 октября 2014г.

4. Чебан Е.Ю. Исследование особенностей динамики разливов нефти в кильватерном следе за счаленными судами / Чебан Е.Ю., Игонина М.В., Капустин И.А., Мольков А.А. // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2016. № 48. С. 152-163.
5. Wu Jiankang a, T.S. Leeb,* , C. Shu Numerical study of wave interaction generated by two ships moving parallelly in shallow water b Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 190 (2001) 2099±2110.
6. S. Ermakov, I. Kapustin, T. Lazareva Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: observations and physical mechanisms // Proceedings of SPIE 9240: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions; 92400N. 2014. doi:10.1117/12.2067367
7. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометео-издат. 1985. 376с.

References

1. The simulation of oil spreading process during technological operations while «ship to ship» mooring [The simulation of oil spreading process during technological operations while «ship to ship» mooring] / E.Cheban, I. Kapustin, A. Molkov, M. Igonina // River transport (XXIst century).2015. – № 5 (76) – p. 42-47.
2. Cheban E.Yu. Experimental Modeling of Oil Spill Spreading in Vessel's Wake Current from "Ship to Ship" Mooring [Experimental Modeling of Oil Spill Spreading in Vessel's Wake Current from "Ship to Ship" Mooring] / Cheban E.Yu., Kapustin I.A., Molkov A.A., Igonina M.V. // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2016, T. 9. № 3. p. 57-65.
3. Modeling of oil spreading in the wake current of vessels. Statement of the problem and preliminary results. [Modeling of oil spreading in the wake current of vessels. Statement of the problem and preliminary results.] / Cheban E.Yu., Kapustin I.A., Molkov A.A., Igonina M.V. // Materials of the 11th International Conference of Users ANSYS / CADFEM ", Moscow, October 14-16, 2014.
4. Cheban E.Yu. Research of oil spill dynamics in vessel's wake current generated by "ship to ship" mooring. / Cheban E.Yu., Igonina M.V., Kapustin I.A., Molkov A.A. // Bulletin of VSAWT. 2016. № 48. p. 152-163.
5. Wu Jiankang a, T.S. Leeb,* , C. Shu Numerical study of wave interaction generated by two ships moving parallelly in shallow water b Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 190 (2001) 2099±2110.
6. S. Ermakov, I. Kapustin, T. Lazareva Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: observations and physical mechanisms // Proceedings of SPIE 9240: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions; 92400N. 2014. doi:10.1117/12.2067367.
7. Monin A. S., Krasickij V. P. Yavleniya na poverhnosti okeana. [Phenomena on the surface of the ocean] L.: Gidrometeo-izdat. 1985. 376s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Егор Юрьевич Чебан, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603905, Нижний Новгород, Нестерова 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Дмитрий Владимирович Никущенко, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Лоцманская 3, 190008, e-mail: Ndmityr@list.ru

Мартемьянова Ольга Вадимовна, аспирант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: dovnn@yandex.ru

Зотова Наталья Евгеньевна, магистрант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, willgelmena@yandex.ru

Egor Yu. Cheban, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environment Safety of Ships Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Dmitry V. Nikuschenko, the professor, Dr. Sci. (Eng), professor of department of ship theory State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, e-mail: Ndmityr@list.ru

Olga Vadimovna Martmianova, post graduate student Hydrodynamics, ship theory and ship's ecological safety department, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5, e-mail: dovnn@yandex.ru

Natalia E. Zotova, master student Hydrodynamics, ship theory and ship's ecological safety department, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5, willgelmena@yandex.ru

УДК 502.175

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.054

Анализ влияния деятельности промышленных предприятий на состояние воды ладожского озера

М.А. Синякова^{1,2}, Л.В. Бронникова¹, Н.И. Бронникова¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет²Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО»

Аннотация. Целью настоящей работы является изучение и анализ распределения концентраций биогенных элементов в водах Ладожского озера. Проведена оценка воздействия производственной деятельности расположенных на берегах Ладожского озера промышленных предприятий, в том числе судостроительного и судоремонтного профиля, на состояние водной среды Ладоги. Работа проведена в рамках реализации мероприятий по охране водных объектов Северо-Западного региона, как одного из приоритетных направлений природоохранной деятельности.

В ходе настоящего исследования был произведен отбор проб воды в различных частях акватории Ладожского озера и их последующий химический анализ по таким важнейшим гидрохимическим показателям, как соединения азота и фосфора. Проведена обработка и анализ полученных проб воды на содержание общего фосфора, минерального фосфора и аммонийного азота, в сравнении с предельно допустимой концентрацией. Результаты обработки полученных проб сопоставлены с результатами аналогичных замеров, полученных в предыдущие годы. По итогам сравнительного анализа дана оценка динамики изменения рассматриваемых показателей состояния Ладожских вод.

Как показали результаты исследования, производственная деятельность судостроительных и судоремонтных предприятий, расположенных в зоне Ладожского озера, не оказывает негативного воздействия на качество Ладожской воды в части ее загрязнения соединениями фосфора и азота. Прогноз в отношении сохранения существующей картины распределения биогенных элементов в воде Ладожского озера положительный.

Ключевые слова: Охрана окружающей среды, Ладожское озеро, судостроительные предприятия, природные воды, гидрохимические характеристики, фосфор, азот.

Analysis of the influence of the activities of industrial enterprises on the water state of the Ladoga lake

Mariia A. Siniakova^{1,2}, Liliya V. Bronnikova¹, Natalia I. Bronnikova¹¹Saint - Petersburg state marine technical University,²Saint Petersburg branch of VNIRO

Annotation. The aim of this work is to study and analyze the distribution of concentrations of nutrients in the waters of Lake Ladoga. The impact of production activities located on the shores of Lake Ladoga industrial enterprises, including shipbuilding and ship repair profile, on the state of the Ladoga water environment has been assessed. The work was carried out as part of the implementation of measures to protect water bodies of the North-West region, as one of the priority areas of environmental protection.

In the course of this study, water samples were taken in various parts of Lake Ladoga and their subsequent chemical analysis by such important hydro-chemical parameters as nitrogen and phosphorus compounds. The processing and analysis of water samples for the content of total phosphorus, mineral phosphorus and ammonium nitrogen was carried out in comparison with the maximum permissible concentration.

The results of processing the obtained samples are compared with the results of similar measurements obtained in previous years. Based on the results of the comparative analysis, an assessment is given of the dynamics of changes in the considered indicators of the state of Ladoga waters.

As the results of the study showed, the production activity of shipbuilding and ship repair enterprises located in the Lake Ladoga zone does not adversely affect the quality of the Ladoga water in terms of its pollution with phosphorus and nitrogen compounds. The forecast regarding the preservation of the existing pattern of distribution of nutrients in the water of Lake Ladoga is positive.

Keywords: Environmental protection, Lake Ladoga, shipbuilding enterprises, natural waters, hydro-chemical characteristics, phosphorus, nitrogen.

Состояние водных ресурсов Ладожского озера тесно связано с деятельностью различных промышленных предприятий, а также сельскохозяйственных организаций населенных пунктов. Для некоторых из них Ладожское озеро является источником водоснабжения, для других – объектом, принимающим сточные воды, а иногда – и тем и другим одновременно. По акватории озера перемещается водный транспорт. В число важнейших водопользователей входят судостроительные предприятия: ООО «Невский судостроительно-судоремонтный завод», ООО

«Ладожская верфь», ООО «Озерная верфь». Кроме того, ряд предприятий и организаций, размещенных на прилегающих территориях, в том числе ОАО «Свирская судостроительная верфь», ОАО «Волховский алюминий», Волховский филиал АО «Апатит» (входящий в ПАО «ФосАгро»), сбрасывают свои сточные воды в реки, являющиеся притоками Ладоги, что также оказывает влияние на состояние Ладожских вод.

Целью настоящей работы являлось изучение и анализ распределения концентраций биогенных элементов в водах Ладожского озера, в рамках

исследования воздействия производственной деятельности судостроительных комплексов на состояние водных ресурсов Северо-Западного региона. В ходе настоящего исследования был произведен отбор проб воды в различных частях акватории Ладожского озера и проведен их последующий химический анализ по ряду гидрохимических показателей. Одними из важнейших показателей состояния качества водного объекта являются соединения фосфора и азота, которые присутствуют в промышленных стоках предприятий.

Ладожское озеро – крупнейший в Европе пресноводный водоем; оно отличается своеобразием гидрологических характеристик и находится в плотно заселенном и экономически важном Северо-Западном регионе России. Состояние Ладожского озера в значительной степени определяет функционирование этого региона и имеет громадное значение для его жителей. Это обстоятельство обусловило закономерный интерес исследователей к этому водоему, направленный, в том числе и на определение его гидрохимических характеристик и их изменений во времени.

Следует отметить, что охрана водных объектов – это одно из приоритетных направлений природоохранной деятельности, которое находится в ведении органов государственной власти Российской Федерации. На законодательном уровне задачи по предотвращению загрязнения водных объектов изложены в главе 6 Водного кодекса РФ, Федеральном законе от 10.01.2002 № 7-ФЗ "Об охране окружающей среды" [1], а также в иных нормативно-правовых актах органов государственной власти. Допустимые выбросы опасных веществ в водную среду рассчитываются на основании нормативов качества окружающей среды, в том числе предельно допустимых концентраций, с учетом фоновое состояние компонентов природной среды.

На основании Распоряжения Правительства РФ от 08.07.2015 N 1316-р «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды» для водных объектов фосфаты (по фосфору) являются одним из тех загрязняющих веществ, концентрации которых не должны превышать установленных значений [2]. Количественные значения ПДК введены Распоряжением Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 года N 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного назначения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного назначения (с изменениями на 12 октября 2018 года)» [3].

Фосфор присутствует в воде в виде растворимых соединений и является необходимым фактором развития живых организмов. Соотношение между расходом растворимых форм фосфора на химические и биохимические процессы, в том числе фотосинтез, и поступлением их в водоем в результате природных и антропогенных процессов определяет концентрацию его соединений в воде в

каждый конкретный момент времени [6]. Азот, в свою очередь, является четвертым по значению элементом биомассы.

Недостаток соединений азота и фосфора в природных водоемах часто является лимитирующим фактором развития биоты; с другой стороны, при повышении их концентрации начинается бурное развитие биомассы, нередко приводящее к нарушению кислородного баланса – происходит эвтрофирование водного объекта [7,11, 14]. В природных водах фосфор может находиться в растворимой, в минеральной (реакционноспособной фосфор) и в органической (нереакционноспособной) форме. Сумма всех этих трех форм называется общим фосфором. Количество общего фосфора в природной незагрязненной воде обычно находится в пределах от 5 до 200 мкг/дм³ [13].

Интенсификация хозяйственной деятельности в Северо-Западном регионе в конце 60-х– 70-х годах XX века привела к резкому увеличению поступления фосфора в Ладожское озеро и, как следствие, к повышению в несколько раз концентрации растворимых форм фосфора в воде этого водоема [4,8,10]; основную роль в этом процессе сыграло алюминиевое производство, находящееся в г. Волхов (в настоящее время - это ОАО «Волховский алюминий»). Однако, начиная с 1983-1984 гг., вследствие проведения природоохранных мероприятий, началось постепенное снижение выноса фосфора в озеро; содержание соединений фосфора стало снижаться, и эта тенденция сохраняется в целом и в настоящее время. Соединения фосфора поступают в реку Волхов, а затем и в Ладожское озеро и со стоками ПАО «ФосАгро» [5]. Следует отметить, что судостроительные и судоремонтные предприятия не относятся к числу приоритетных источников поступления фосфора в Ладожское озеро.

Уровень концентрации различных соединений азота, в том числе аммонийного, в период наблюдений был более стабилен [10]. Для Ладожских вод в целом характерно невысокое содержание ионов аммония, которое редко превышает 0,01 мг/дм³ [10]. Значительная часть этого азота, в том числе и аммонийного, выносится в Ладогу с водами реки Волхов.

Экспериментальная часть

Отбор проб воды производился в период с 24.07.2019 по 03.08.2019 года в прибрежных и глубоководных частях Ладожского озера. Рейс проводился в рамках трехстороннего соглашения о сотрудничестве между Санкт-Петербургским филиалом ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга), ФГБУН Институтом озераведения РАН и Управлением ветеринарии Ленинградской области, в рамках государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» № 076-00005-10-00, часть II, раздел 2; в рамках государственного задания ФГБУН ИНОЗ РАН по темам №0154-2019-0001 и №0154-2019-0002. Порядок отбора проб определялся маршрутом рейса, частично на станциях «ГосНИОРХ»'а, частично вне их. Места расположения станций показаны на рис. 1.

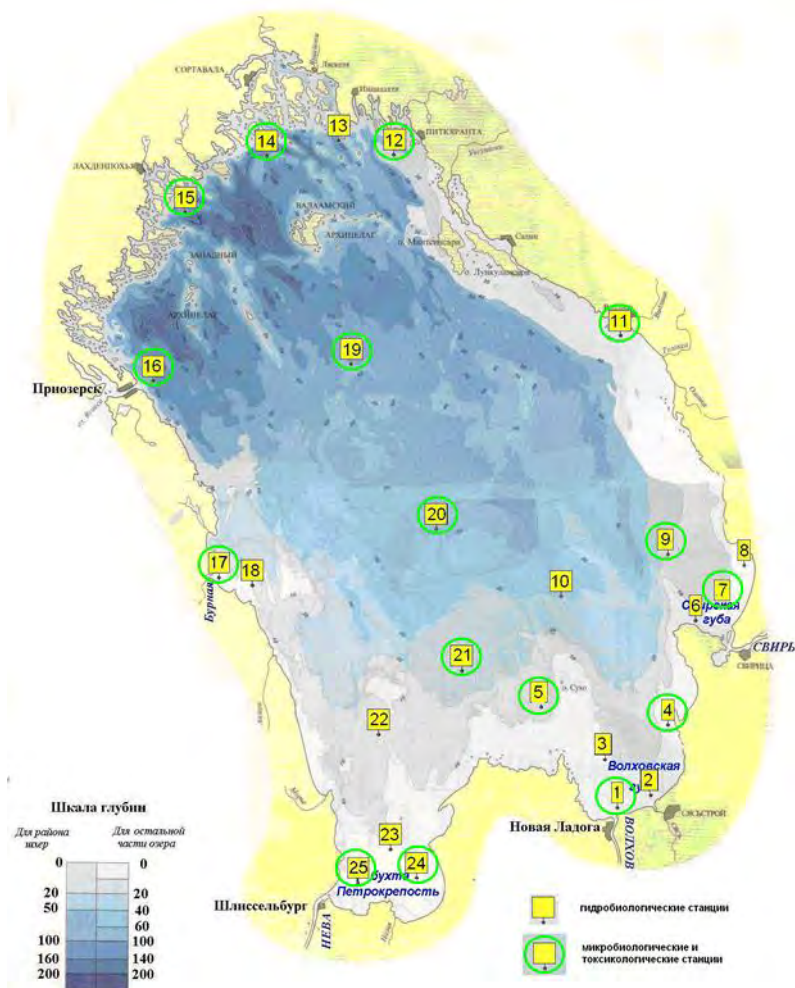


Рис. 1. Карта Ладожского озера с указанием точек отбора проб воды.

В пробах воды определялось содержание общего фосфора, минерального фосфора и аммонийного азота. Определение общего фосфора производилось фотометрически, в соответствии с ГОСТ 18309-2014, метод Г, с персульфатом.

Определение минерального фосфора – фотометрически, в соответствии с ГОСТ 18309-2014, метод Б. Аммонийного азота – фотометрически, с реактивом Несслера.

Результаты эксперимента

Таблица 1

Концентрация биогенных элементов в воде Ладожского озера

№ п.п.	Наименование точек отбора проб	Координаты точек	Фосфор минеральный, мг/дм ³	Фосфор общий, мг/дм ³	Аммонийный азот, мг/дм ³
1.	Ляскеля	61°42.412 31°0.068	0,021	0,099	0,03
2.	Мыс Умоппиуми	61°40.856 31°05.57	0,010	0,045	0,07
3.	Выход из залива Импилахти	61°37.278 31°10.314	0,029	0,25	0,01
4.	о. Путсари	61°30.862 30°31.783	0,065	0,25	ниже предела обнаружения
5.	Питкяранта, напротив завода ЦБК	61°32.866 31°27.586	0,018	0,105	ниже предела обнаружения
6.	Питкяранта, открытое озеро	61°33.92 31°28.037	0,024	0,077	0.00
7.	Залив Уксунлахти	61°24.026 31°40.497	0,008	0,09	0,26
8.	о. Мäнтсинсаари	61°20.521 31°39.829	0,005	0,214	0,045

№ п.п.	Наименование точек отбора проб	Координаты точек	Фосфор минеральный, мг/дм ³	Фосфор общий, мг/дм ³	Аммонийный азот, мг/дм ³
9.	Ст.11, поверхность	61°08.308 32°13.526	0,003	0,130	ниже предела обнаружения
10.	Ст.11, дно	61°08.308 32°13.526	0,004	0,25	ниже предела обнаружения
11.	Андрусовская бухта	61°58.744 32°36.271	0,001	0,012	ниже предела обнаружения
12.	Ст. 8	Координаты уточняются	0,002	0,005	ниже предела обнаружения
13.	Свирская губа, пляж	60°37.190 32°57.315	0,006	0,013	ниже предела обнаружения
14.	Устье Свири	60°29.842 32°48.899	0,001	0,009	ниже предела обнаружения
15.	Якимварский залив, около Сорола, поверхность	61°29.398 30°15.333	0,005	0,091	ниже предела обнаружения
16.	Якимварский залив около Сорола, дно	61°29.398 30°15.333	0,009	0,095	ниже предела обнаружения
17.	Залив у полуострова Рауталаhti	61°45.059 30°52.699	0,008	0,214	ниже предела обнаружения
18.	Рауталаhti, открытая часть озера, поверхность	Координаты уточняются	0,007	0,250	0,055
19.	Рауталаhti, открытая часть озера, дно	Координаты уточняются	0,004	0,019	0,056
20.	Лахденпохья, поверхность	61°30.988 30°12.948	0,004	0,118	0,015
21.	Лахденпохья, дно	61°30.988 30°12.948	0,007	0,121	0,025
22.	Приозерск	61°02.644 30°10.716	0,005	0,145	0,07
23.	Владимирская бухта	60°50.203 30°28.235	0,016	0,017	0,058
24.	Тайнопольский залив, устье Бурной	60°37.174 30°31.635	0,01	0,192	ниже предела обнаружения
	ПДК		0,2 (по P)	-	0,5

Примечание: ПДК на «общий фосфор» в воде рыбохозяйственных водоемов не установлен.

Из представленных в табл.1 данных видно, что концентрация общего фосфора менялась от 0,017 до 0,25 мг/дм³, что соответствует ожиданиям. Увеличение содержания общего фосфора наблюдается в тех местах, где отмечается повышенная антропогенная нагрузка: п. Импилахти, п-ов Рауталаhti, Тайполовский залив в районе устья р. Бурная.

Концентрация минерального фосфора составляет единицы и десятки мкг/дм³; она выше среднего уровня в северной части Ладожского озера (возле г. Питкяранта, острова Путсари) и ниже среднего уровня в более южных районах (Владимирская бухта, устье р. Свирь). Даже в устье р. Бурная концентрация минерального фосфора мала.

Концентрация аммонийного азота колебалась от концентраций ниже предела обнаружения до 0,058 мкг/дм³. Невысокое содержание ионов NH₄⁺ характерно для Ладожских вод. В единичном случае отмечена концентрация значительно выше – 0,26 мкг/дм³ (Залив Уксулаhti), что, вероятно, связано с влиянием впадающей реки Уксун.

Таким образом, превышений ПДК по биогенным элементам не выявлено. Это означает, что качество воды в Ладожском озере по данным параметрам удовлетворяет требованиям. Разумеется, природная вода – это сложная комплексная система, для описания качества которой используется целый

набор характеристик [9], но среди этих характеристик концентрации растворимых форм фосфора и азота являются одними из важнейших. Как отмечалось выше, в природных водоёмах именно концентрация соединений азота (в том числе в форме хорошо усвояемого NH₄⁺) и фосфора лимитирует развитие биоты, включая биообращения [14], что имеет значение для большинства потребителей, и судоремонтные и судостроительные предприятия не являются исключением. Значение этого фактора возрастает при переходе к оборотным системам водопользования: развитие прикрепленных организмов на внутренних поверхностях труб, резервуаров и других видов оборудования является одной из главных проблем, возникающих при замыкании воды в оборот, и не случайно то, что содержание биогенных элементов входит в число важнейших требований к качеству оборотной воды [12].

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что уровень концентрации биогенных элементов в части соединений фосфора и азота находится в пределах допустимого; сохраняется тенденция к нормализации состояния Ладожских вод после их активного загрязнения фосфором в 80-е годы XX века. Относительное (по отношению к среднему урою) повышение содержания общего

фосфора и ионов аммония достаточно четко коррелирует с зонами повышенной антропогенной нагрузки, но при этом ни в одной из исследованных проб не превышает ПДК.

Как показали результаты исследований, производственная деятельность судостроительных и судоремонтных предприятий, расположенных в зоне

Ладожского озера, не оказывает негативного воздействия на качество воды в водоеме в части ее загрязнения соединениями фосфора и азота, что позволяет дать положительный прогноз в отношении сохранения существующей картины распределения биогенных элементов в воде Ладожского озера.

Литература

1. Федеральный закон "Об охране окружающей среды" от 10.01.2002 № 7-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации.
2. Распоряжение Правительства РФ "Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды" от 08.07.2015 N 1316-р // Собрание законодательства Российской Федерации.
3. Приказ Министерства сельского хозяйства "Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения" от 13 декабря 2016 года № 552 // Собрание законодательства Российской Федерации.
4. Аджиев В.Е. Очистка поверхностных водных объектов от донных отложений: причины заиливания и экономика проблемы // Вода: химия и экология, 2010. Вып. 3. - С. 26 – 36.
5. Вольф И.В., Синякова М.А. Химия окружающей среды. Химия гидросферы. СПб.: изд-во СПбГТУРП, 2013. – 90 с.
6. Горбачёв Е., Долгушев Н. Влияние Волховского алюминиевого завода на экологию города: вчера и сегодня // Волховские огни. 2019. 11 января 2019.
7. Дягилева А.Б., Лоренцсон А.В., Чернобережский Ю.М. Технология основных производств и промышленная экология. СПб.: изд-во СПбГТУРП, 2004. – 89 с.
8. Занько Н.Г., Малаян К.Р., Русак О.Н. Безопасность жизнедеятельности. // Под ред. Русака О.Н.. СПб.: Лань, 2010.- 672 с.
9. Игнатьева Н.В., Петрова Т.Н., Гусева М.А. Оценка загрязнённости поверхностных вод на территории водосборного бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 6. С. 91-9.
10. Ихсанова А.Р. Фосфор в природных водах // Студенческий: электрон. научн. журн. 2018. № 23(43)
11. Полетаева В.В., Пастухов М.В., Загорулько Н.А., Белоголовова Г.А. Изменение гидрохимического состава вод в заливах Братского водохранилища в результате лесозаготовительных работ. // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 3. С. 278-288.
12. Реймерс Н.Ф. Природопользование. - М.: Мысль, 1990. – 638 с.
13. Ладога. Монография./ Под ред. академика РАН, профессора В. А. Румянцев, д-ра физ.-мат. наук С. А. Кондратьева. СПб.: Наука, 2013. – 560 с.
14. Экологи: реку Волхов загрязняет завод "ФосАрго" // 47news.ru URL: <https://47news.ru/articles/119033/> (дата обращения: 14.05.2019).

References

1. Federal Law on Environmental Protection of 10.01.2002 No. 7-Fz / Assembly of Legislation of the Russian Federation.
2. The Russian Government's Order "On the approval of the list of pollutants against which the measures of state regulation in the field of environmental protection are applied" of 08.07.2015 N 1316-r / Assembly of legislation of the Russian Federation.
3. Order of the Ministry of Agriculture "On the approval of water quality standards of water objects of agricultural importance, including the standards of the maximum allowable concentrations of harmful substances in the waters of water objects of agricultural importance" of December 13, 2016 No. 552 / Assembly of legislation of the Russian Federation.
4. Ajenko V.E. Cleaning of surface water objects from bottom sediments: causes of silting and economics problem // Water: Chemistry and Ecology, 2010. Vol. 3. - S. 26 - 36.
5. Wolf I.V., Sinyakova M.A. Environmental Chemistry. The chemistry of the hydrosphere. St. Petersburg: SPBGTURP, 2013. 90s.
6. Gorbachev E., Dolgushn N. Influence of the Volkhov aluminium smelter on the ecology of the city: yesterday and today / Volkhov lights. January 11, 2019.
7. Diaghileva A.B., Lorenzson A.V., Chernobanky Y.M. Technology of major industries and industrial ecology. St. Petersburg: SPBGTURP, 2004. 89 s.
8. Sanko N.G. Malayan K.R. Rusak O.N. Life Safety. Ed. Rusaka O.N. St. Petersburg: Lan, 2010.- 672 s.
9. Ignatieva N.V., Petrova T.N., Guseva M.A. Assessment of surface water pollution in the Ladoga Lake catchment area according to hydrochemical indicators. Izvestia of the Samara Research Center of the Russian Academy of Sciences. 2015 T. 17. No 6. S. 91-9.
10. Ixanova A.R. Phosphorin in natural water // Student: electron. Scientific. It's jorn. 2018. No 23(43)
11. Poletaeva V.V., Pastukhov M.V., zagorulko N.A., Belogolova G.A. Changing the hydrochemical composition of water in the bays of the Fraternal Reservoir as a result of logging. Water. 2018. T. 45. No 3. S. 278-288.
12. Reimers N.F. Nature Management. - M.: Thought, 1990. 638 s.

13. Ladoga. Monograph. / Ed. Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor V. A. Rumyantsev, Dr. Physics. S.A. Kondratieva. St. Petersburg: Science, 2013. 560 s.
14. Environmentalists: The Volkhov River is polluted by the FosAgro plant / 47news.ru URL: <https://47news.ru/articles/119033/> (address date: May 14, 2019).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мария Александровна Синякова, кандидат химических наук, доцент кафедры эргономики, экологии и трудового права, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3, ведущий научный сотрудник Лаборатории рыбохозяйственной экологии, Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им Л. С. Берга), 199055, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 26, e-mail kafischem@yandex.ru

Mariia A. Siniakova, PhD (chem), assistant professor, Saint-Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, leading researcher, Laboratory of fisheries ecology, Saint Petersburg branch of VNIRO (GosNIORKH named after L.S. Berg), Naberezhnaya Makarova, 26, St. Peterburg, 199053, Russian Federation, e-mail kafischem@yandex.ru

Лилия Васильевна Бронникова, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой эргономики, экологии и трудового права, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3 e-mail: bronnikova.lili@gmail.com

Liliya V. Bronnikova, Ph.D. (Econ), assistant professor, head of the Department of ergonomics, ecology and labor law of the Saint-Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation e-mail: bronnikova.lili@gmail.com

Наталья Игоревна Бронникова, бакалавр, Северо-западный институт управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ: 199178, Санкт-Петербург, В.О., Средний пр. В.О., д. 57/43, e-mail: bronnikovaaaa@mail.ru

Natalia I. Bronnikova, baccalaureate, North-West Institute of Management – branch of the RANEPА University, Average pr., V.O., 57/43, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: bronnikovaaaa@mail.ru

УДК 544.638+534.1
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.055

Реализация приемной акустической антенны с помощью электрокинетического явления потенциал течения. Электрохимический аспект

Б.П. Шарфарец¹, Ф.Ф. Легуша²

¹Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Рассматривается возможность акустоэлектрического преобразования с использованием явления потенциала течения, обратного к другому электрокинетическому явлению - электроосмосу. Обратимость двух этих явлений позволяет использовать один преобразователь, содержащий заполненную жидкостью мембрану, к торцам которой подведены электроды, либо в режиме излучателя, либо в режиме приемника акустической энергии. В первом случае к электродам подается электрическое поле, во втором случае преобразователь находится в стороннем акустическом поле, а с электродов снимается напряжение, отвечающее стороннему акустическому полю. Работа состоит из двух частей. В настоящей части рассматриваются электрохимические аспекты, а именно получается дифференциальное уравнение, связывающее градиенты потенциала течения и акустического давления в теле преобразователя. Из этого уравнения следует выражение для объемной силы в двойном электрическом слое на границе раздела фаз в пористой структуре. Сила вызывается вектором электрической напряженности, возникающей вследствие образования в пористой структуре потенциала течения. Вывод зависимости потенциала течения от перепада давления приводится с помощью аппарата неравновесной термодинамики. Согласно этому подходу электроосмос и потенциал течения описываются уравнениями термодинамики неравновесных процессов, кинетические коэффициенты которых удовлетворяют соотношениям Онзагера, а вся система является линейной, в том числе и относительно перепада давления и потенциала течения. Полученное выражение для объемной силы в жидких порах мембраны позволит в следующей части статьи изучить акустические аспекты процесса акустоэлектрического преобразования на основе использования явления потенциала течения. Предлагаемый подход к созданию приемной антенны на явлении потенциала течения является новым по причине того, что для увеличения эффективности акустоэлектрического преобразования предполагается применение постоянного напряжения накачки на электродах преобразователя. Результаты работы могут быть использованы при теоретической разработке и практическом конструировании обратимых электроакустических преобразователей нового типа, построенных на использовании электрокинетических явлений.

Ключевые слова: Электрокинетические явления, электроосмос, потенциал течения, акустический излучатель, обратимый преобразователь, акустический приемник, термодинамика неравновесных процессов, теорема Онзагера.

Implementation of a receiving acoustic antenna using an electrokinetic phenomenon of potential flow. Electrochemical aspect

Boris P. Sharfarets¹, Fedor F. Legusha²

¹Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, ²St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The possibility of acoustoelectric conversion using the phenomenon of the potential of the flow, the inverse of another electrokinetic phenomenon - electroosmosis. The reversibility of these two phenomena makes it possible to use a single transducer containing a liquid-filled membrane, to the ends of which electrodes are connected, either in the emitter mode or in the receiver mode of acoustic energy. In the first case, an electric field is supplied to the electrodes, in the second case, the transducer is located in an external acoustic field, and the voltage corresponding to the external acoustic field is removed from the electrodes. The work consists of two parts. In this part, electrochemical aspects are considered, namely, a differential equation is obtained that relates the gradients of the flow potential and acoustic pressure in the transducer body. From this equation follows the expression for the volumetric force in a double electric layer at the phase boundary in a porous structure. The force is caused by the vector of electric tension arising from the formation of the flow potential in the porous structure. The derivation of the dependence of the flow potential on the pressure drop is given using the apparatus of nonequilibrium thermodynamics. According to this approach, electroosmosis and the flow potential are described by the equations of thermodynamics of nonequilibrium processes. The kinetic coefficients of this system satisfy the Onsager relations, and the entire system is linear, including with respect to the pressure drop and flow potential. The obtained expression for the volumetric force in the liquid pores of the membrane will allow us to study the acoustic aspects of the acoustoelectric conversion process based on the use of the phenomenon of flow potential in the next part of the article. The proposed approach to creating a receiving antenna on the phenomenon of flow potential is new due to the fact that in order to increase the efficiency of acoustoelectric conversion, it is proposed to use a constant pump voltage at the electrodes. The results of the work can be used in the theoretical development and practical construction of a new type of reversible electroacoustic transducers based on the use of electrokinetic phenomena.

Key words: Electrokinetic phenomena, electroosmosis, flow potential, reversible transducer, acoustic Emitter, acoustic receiver, thermodynamics of nonequilibrium processes, Onsager's theorem.

Введение

В работах [1-6] начат цикл статей, описывающих физические модели для реализации излучателя нового вида, основанного на использовании такого процесса электрокинетических явлений (ЭЯ), как электроосмос. В этом цикле будут описаны физические процессы, проясняющие принцип действия этого излучателя. Вместе с тем в ЭЯ существует процесс, обратный электроосмосу, носящий название потенциала течения.

В работе [7] описывается принцип действия акустоэлектрических преобразователей, основанных на явлении потенциала течения, приводится библиография по этому вопросу.

В работе [8, § 3.11] описан принцип действия приемной электроакустической антенны, основанной на электрокинетических явлениях не в пористой, а в дисперсной среде (в суспензиях и золях). В этом случае работа электроакустического преобразования основана на использовании другой пары электрокинетических явлений: электрофорез – эффект Дорна (потенциал седиментации). Там же приведена библиография, посвященная этому вопросу.

В работе [9] с общетеоретических позиций рассматривается возможность создания акустоэлектрического преобразователя, основанного также на применении потенциала течения. Однако в этой работе предлагаемый алгоритм рассмотрен только с теоретических позиций.

Настоящая работа, являясь продолжением работы [9], состоит из двух частей, где предполагается тщательная экспериментальная верификация предложенной в [9] теории.

В настоящей части статьи кратко рассматриваются электрохимические аспекты, а именно приводится дифференциальное уравнение, связывающее градиенты потенциала течения и акустического давления в теле преобразователя, из которого следует выражение для объемной силы, вызванной вектором электрической напряженности, обусловленной возникновением потенциала течения.

1. Постановка проблемы

С целью возможности обращения излучающей акустической антенны, работающей на основе процесса электроосмоса, в приемную акустическую антенну необходимо кратко описать математическую модель процесса с использованием такого обратного к электроосмосу явления, как потенциал течения.

2. Решение проблемы

Электрокинетические эффекты подробно описаны в научной литературе (см., например, [6, с. 534; 11-14]). Здесь подробнее опишем явление потенциала течения (протекания).

Потенциал течения.

Потенциал течения (протекания – это скачок разности потенциалов на электродах, расположенных на концах капиллярно-пористой среды, возникающий при протекании через нее электролита. Таким образом, в потенциале течения источником возникновения электрического поля является движение самой жидкости. Основную роль здесь играют двойной электрический слой (ДЭС),

формирующийся на границе раздела фаз, и его поляризация. Механизмы образования электрического потенциала течения подробно рассмотрены в упомянутых в предыдущем абзаце источниках, а также в части касающейся в работе [9]. Дадим лишь краткое описание процесса для корректности следующего изложения.

Часть ионов одного знака диффузной части ДЭС увлекается течением жидкости, что приводит к появлению разности потенциалов между резервуарами и вызывает появление электрического тока в направлении, противоположном конвективному переносу заряда. Разность потенциалов, установившаяся при компенсации этих токов, называется потенциалом течения.

В работах [11-14] и ряде других работ приводится выражение, связывающее потенциал течения (разность потенциалов) $\Delta\phi$ с величиной перепада давления Δp . Однако, вследствие отличий, приведенных там выражений этой зависимости, в настоящей работе приводится подробный его вывод, основанный на материалах работы [12, § 15.11.4], где в итоге приведено неверное выражение, описывающее зависимость потенциала течения от перепада давления.

Выражение для потенциала течения. Вывод зависимости потенциала течения от перепада давления приводим, следуя работе [12, § 15.11.4], где эта зависимость получена с помощью аппарата неравновесной термодинамики. Согласно этому подходу электроосмос и потенциал течения описываются уравнениями термодинамики неравновесных процессов. Средние по сечению мембраны скорость жидкости \bar{V} , проходящей через мембрану, и плотность тока \bar{i} (записываем эти векторные величины в виде единственных, отличных от нуля проекций), связаны с перепадом давления Δp и разностью потенциала на торцах мембраны $\Delta\phi$ феноменологическим соотношением неравновесной термодинамики [12, § 15.11.4]

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \Lambda_{11}\Delta p + \Lambda_{12}\Delta\phi, \\ \bar{i} &= \Lambda_{21}\Delta p + \Lambda_{22}\Delta\phi, \end{aligned} \quad (1)$$

где кинетические коэффициенты Λ_{11} , Λ_{12} , Λ_{22} характеризуют соответственно гидродинамическую проницаемость мембраны, скорость осмотического течения, ток течения и электропроводность электролита. Кинетические коэффициенты удовлетворяют соотношениям Онзагера (теорема Онзагера)

$$\Lambda_{12} = \Lambda_{21}, \quad (2)$$

а вся система (1) является линейной относительно перепада давления Δp и потенциала течения $\Delta\phi$.

Найдем последовательно величины Λ_j (далее везде используется система СИ). Для этого для упрощения задачи будем в качестве пористой системы рассматривать одиночный капилляр, электрокинетические процессы, в котором физические процессы подобны процессам в обычной пористой структуре при не очень обременительных допущениях [11, § 2.2]. Скорость осмотического течения V_{eo} в капилляре при условии $a \gg \lambda_D$, где a – радиус капилляра, а λ_D – длина Дебая (примерно

равная толщине ДЭС) практически во всем сечении капилляра равна [15, с. 159]

$$V_{eo} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta} E = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta l} \Delta\varphi. \quad (3)$$

Здесь $E = -\frac{\Delta\varphi}{l}$, где E - амплитуда вектора электрической напряженности \mathbf{E} , приложенной к жидкости; l - длина капилляра; $\varepsilon, \varepsilon_0$ - соответственно диэлектрическая проницаемость жидкости и электрическая постоянная; ζ - дзета потенциал; η - динамическая вязкость жидкости.

Сравнение (1) и (3) дает

$$\Lambda_{12} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta l}. \quad (4)$$

Для средней скорости ламинарного течения в трубке (течение Пуазейля) имеем [16, § 17]

$$\bar{V}_P = \frac{a^2}{8\eta l} \Delta p. \quad (6)$$

Из сравнения (1) и (6) получаем

$$\Lambda_{11} = \frac{a^2}{8\eta l}. \quad (7)$$

Наконец, из второго уравнения (1) получаем, что средняя плотность тока, вызванная потенциалом течения равна

$$\Lambda_{22} = -\frac{\sigma}{l},$$

где σ - удельная проводимость жидкости. Отсюда и из второго уравнения (1) имеем

$$\Lambda_{22} = -\frac{\sigma}{l}. \quad (8)$$

По определению, потенциал течения $\Delta\varphi$ определяется из условия равенства нулю средней плотности тока $\bar{i} = 0$. Тогда из второго уравнения (1) получаем условие для определения потенциала течения

$$\bar{i} = \Lambda_{21}\Delta p + \Lambda_{22}\Delta\varphi = 0. \quad (9)$$

Подставляя в (9) выражения (5) и (8), окончательно получаем для потенциала течения

$$\Delta\varphi = -\frac{\Lambda_{21}}{\Lambda_{22}} \Delta p = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \Delta p, \quad (10)$$

С поправкой на то, что (10) приведено в системе СИ, оно совпадает с точностью до знака, например, с выражением (1.2) в [11, с. 10] или с выражением (IV.16) в [14, с. 184], но не совпадает, как отмечено выше, с выражением (15.112) в работе [12, с. 516], где, по-видимому, присутствует опечатка.

Соотношение (10) показывает, что потенциал течения не зависит от площади сечения капилляра, а задается только величиной перепада давления. Этот результат подтвержден в многочисленных экспериментах для самых многообразных мембран [12, с. 516].

Характерная зависимость потенциала течения от перепада давления для кварцевого капилляра радиусом 10 мкм при течении через него 1-1 электролита с концентрацией 10^{-2} моль/л представлена в работе [12, с. 516, рис. 15.12]. Зависимость при изменении давления от нуля до 0.8 МПа практически линейная и при $\Delta p = 0,8$ МПа значение потенциала течения достигает весьма значительной величины $\Delta\varphi = 240$ В.

При переходе от индивидуального капилляра к реальной связнодисперсной системе (мембрана или диафрагма) возникают осложнения, связанные со структурой порового пространства, в котором происходит перенос вещества и электрического тока. Однако все описанные закономерности типа (1)-(10) остаются справедливыми и в этом случае, только радиус капилляра и его длина заменяются некоторыми размерными коэффициентами, называемыми структурными факторами [14, с. 184].

Полученные результаты можно обобщить на случай переменных во времени величин $\Delta\bar{\varphi}(t)$ и $\Delta\bar{p}(t)$ при условии, что время релаксации зарядов в жидкости много меньше периодов колебаний величин $\bar{\varphi}(t)$ и $\bar{p}(t)$. Тогда выражение (10) можно переписать в следующем виде

$$\Delta\varphi(t) = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \Delta p(t). \quad (11)$$

Преобразуем (11) в дифференциальную форму. Помножим обе части (11) на $-\rho_e/l$. Имеем (зависимость от времени t опускаем для краткости)

$$-\rho_e \frac{\Delta\varphi}{l} = \rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \frac{\Delta p}{l}. \quad (12)$$

Свяжем выражения (11), (12) с такими величинами, как вектор напряженности электрического поля и градиентом давления. При $l = \Delta z \rightarrow 0$ имеем из (12)

$$\begin{aligned} \rho_e \left(-\frac{\Delta\varphi}{\Delta z} \right) &= \rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \frac{\Delta p}{\Delta z} \Rightarrow \\ \Rightarrow \rho_e \left(-\frac{\partial\varphi}{\partial z} \right) &= \rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \frac{\partial p}{\partial z}. \end{aligned} \quad (13)$$

Обозначим через $\bar{\mathbf{E}} = -\nabla\bar{\varphi}$ - среднее по сечению капилляра значение вектора электрической напряженности, соответствующего потенциалу течения. С учетом допущения $\bar{\mathbf{E}} = (0, 0, \bar{E})$ из цепочки (13) получаем

$$\rho_e \mathbf{E} = \rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \nabla p. \quad (14)$$

Таким образом, в рамках принятых предположений при проведенных выше выкладках получено, что объемная электрическая сила в уравнении Навье-Стокса $\rho_e \mathbf{E}$ (см. [1-3, 11-13, 17] и др.), действующая при электроосмосе, эквивалентна объемной силе $\rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \nabla p$, действующей при потенциале течения.

В случае гармонического процесса с циклической частотой ω выражение (14) переписывается в виде

$$\rho_e \mathbf{E}(\omega) = \rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \nabla p(\omega). \quad (15)$$

Здесь под \mathbf{E} и p принимаются модули гармонических величин $\mathbf{E}e^{-i\omega t}$ и $p e^{-i\omega t}$.

Таким образом, в случае потенциала течения возникает действующая на жидкость объемная сила $\rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \nabla p$, которая эквивалентна объемной силе $\rho_e \mathbf{E}$, характерной для процесса электроосмоса, где

Е - значение вектора напряженности электрического поля, отвечающего потенциалу течения. Это позволяет воспользоваться полной системой уравнений электрогидродинамики [17], представленной усеченно, например, в работах [1-3, 11-13, 15]. После чего возникает возможность анализа акустического аспекта процесса.

Этим вопросам будет посвящена следующая часть этой работы.

Заключение

В работе рассмотрены электрохимические аспекты процесса реализации приемной антенны, основанной на применении электрокинетического явления потенциал течения. Полученные результаты

являются новыми и позволяют в полной мере использовать формализм совместного исследования нелинейной задачи гидродинамики и линейной задачи акустики, использовавшийся при решении прямой задачи излучения звука электроакустическим преобразователем, использующим явление электроосмоса [2-6].

Результаты работы после их верификации в условиях натурального эксперимента (что планируется в следующей части этой работы) могут быть использованы при теоретической разработке и практическом конструировании обратимых электроакустических преобразователей нового типа, построенных на использовании электрокинетического явления потенциал течения.

Дополнительная информация

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания 075-00780-20-00 по теме № 0074-2019-0013 Министерства науки и высшего образования.

Литература

1. Сергеев В.А., Шарфарец Б.П. Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Часть I. Гидродинамический аспект. // Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 2. С. 25-35.
2. Сергеев В.А., Шарфарец Б.П. Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Часть II. Акустический аспект. // Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 2. С. 36-44.
3. Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Шарфарец Б.П., Гуляев Ю.В. Теоретическое обоснование нового метода электроакустического преобразования. Линейное приближение. // Доклады Академии Наук. 2018. Т. 483. № 3. С. 260-264.
4. Шарфарец Б.П., Лебедев Г.А., Пыхов Д.С, Сергеев В.А., Сетин А.И. Акустический преобразователь, построенный на использовании электрокинетических явлений. // Морские интеллектуальные технологии. 2019. 1 (43) Т. 1. С. 147-152.
5. Шарфарец Б.П., Горин С.В., Майоров С.В., Лукьянов В.Д., Сетин А.И. Система уравнений электрогидродинамики для расчета электроакустического преобразователя нового типа // Морские интеллектуальные технологии. 2019. 1 (43) Т. 1. С. 153-158.
6. Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Гуляев Ю.В. О методе электроакустического преобразования, основанном на электрокинетических явлениях // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 4. С. 453-462.
7. Касимзаде М.С., Халилов Р.Ф., Балашов А.Н. Электрокинетические преобразователи информации. М.: Энергия. 1973. 136 с.
8. Жуков А.Н. Электроповерхностные явления в капиллярных и дисперсных системах: Учебное пособие. СПб: Издательство СПбГУ. 2012. 112 с.
9. Шарфарец Б.П. Реализация приемной антенны на механизме электрокинетического явления «потенциал течения» // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 2. С. 103-108.
10. Физическая энциклопедия. Т. 5. / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Большая Российская энциклопедия. 1998. 760 с.
11. Духин С.С., Дерягин Б.В. Электрофорез. М.: Наука. 1986. 332 с.
12. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности. Долгопрудный: «Интеллект». 2011. 568 с.
13. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. М.: Мир. 1977. 464 с.
14. Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Высшая школа. 2004. 445 с.
15. Bruus H. Theoretical Microfluidics. Oxford University Press. 2008. 346 P.
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736
17. Шарфарец Б.П. Система уравнений электрогидродинамики применительно к электроосмотическим процессам // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 135-142.

References

1. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. Ob odnom novom metode elektro-akusticheskogo preobrazovaniya. Teoriya, osnovannaya na ehlektrokineticheskikh yavleniyah. Chast' I. Gidrodinamicheskij aspekt [About one new method of electro-acoustic conversion. Theory based on electrokinetic phenomena. Part I. Hydrodynamic aspect]. Nauchnoe priborostroenie. 2018. T. 28. № 2. S. 25-35.
2. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. Ob odnom novom metode elektroakusticheskogo preobrazovaniya. Teoriya, osnovannaya na elektrokineticheskikh yavleniyakh. Chast' II. Akusticheskij aspekt [About one new method of electro-acoustic conversion. Theory based on electrokinetic phenomena. Part II The acoustic aspect.]. Nauchnoe priborostroenie. 2018. T. 28. № 2. S. 36-44.
3. Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Sharfarets B.P., Gulyaev Yu.V. Teoreticheskoe obosnovanie novogo metoda elektroakusticheskogo preobrazovaniya. Lineynoe priblizhenie [Theoretical Justification of a New Method of

- Electroacoustic Transformation: The Linear Approximation]. // Doklady Akademii Nauk. 2018. T. 483. № 3. S. 260-264.
4. Sharfarets B.P., Lebedev G.A., Pykhov D.S., Sergeev V.A., Setin A.I. Akusticheskiy preobrazovatel', postroenny na ispol'zovanii elektrokineticheskikh yavleniy [Acoustic converter designed on the basis of use of electrokinetic phenomena]. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2019. 1 (43) T. 1. S. 147-152.
 5. Sharfarets B.P., Gorin S.V., Mayorov S.V., Luk'yanov V.D., Setin A.I. Sistema uravneniy elektrogidrodinamiki dlya rascheta elektroakusticheskogo preobrazovatelya novogo tipa [The system of electrohydrodynamic equations for calculating a new type of electro-acoustic transducer] // Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2019. 1 (43) T. 1. S. 153-158.
 6. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Gulyaev Yu.V. O metode elektroakusticheskogo preobrazovaniya, osnovannom na elektrokineticheskikh yavleniyakh yavleniyakh [On the Electroacoustic Transformation Method Based on Electrokinetic Phenomena] // Akust. zhurn. 2020. T. 66. № 4. S. 453-462.
 7. Kasimzade M.S., Khalilov R.F., Balashov A.N. Elektrokineticheskie preobrazovateli informatsi [Electrokinetic information converters]. M.: Energiya. 1973. 136 s.
 8. Zhukov A.N. Elektropoverkhnostnye yavleniya v kapillyarnykh i dispersnykh sistemakh: Uchebnoe posobie [Electrosurface phenomena in capillary and disperse systems. Tutorial]. SPb: Izdatel'stvo SPBGU. 2012. 112 s.
 9. Sharfarets B.P. Realizatsiya priemnoy anteny na mekhanizme elektrokineticheskogo yavleniya «potentsial techeniya» » [Implementation of the receiving antenna on the mechanism of the electrokinetic phenomenon "potential flow"]. // Nauchnoe priborostroenie. 2019. T. 29. № 2. S. 103-108.
 10. Fizicheskaya entsiklopediya [Physical Encyclopedia]. T. 5. / Pod red. A.M. Prokhorova. M.: Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya. 1998. 760 s.
 11. Dukhin S.S., Deryagin B.V. Elektroforez [Electrophoresis]. M.: Nauka. 1986. 332 s.
 12. Roldugin V.I. Fizikokhimiya poverkhnosti [Physicochemistry of the surface] Dolgoprudnyy: «Intellekt». 2011. 568 s.
 13. N'yumen Dzh. Elektrokhimicheskie sistemy [Electrochemical systems]. M.: Mir. 1977. 464 s.
 14. Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. Kolloidnaya khimiya. M.: Vysshaya shkola. 2004. 445 s.
 15. Bruus H. Theoretical Microfluidics. Oxford University Press. 2008. 346 P.
 16. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika. T. 6. Gidrodinamika [Theoretical physics. V. 6. Hydrodynamics]. M.: Nauka. 1986. 736
 17. Sharfarets B.P. Sistema uravneniy elektrogidrodinamiki primenitel'no k elektroosmoticheskim protsessam [The system of equations of electrohydrodynamics as applied to electroosmotic processes]. // Nauchnoe priborostroenie. 2019. T. 29. № 1. S. 135-142.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Борис Пинкусович Шарфарец, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26, e-mail: bshar@yandex.ru

Boris P. Sharfarets, Dr. Sci. (Phys & Math), the Chief Researcher, Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Rizhsky pr., 26, St. Petersburg, 190103, Russian Federation, e-mail: bshar@yandex.ru

Фёдор Фёдорович Лёгуша, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: legusha@smtu.ru

Fedor F. Legusha, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Professor of the Department of physics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: legusha@smtu.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.93

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.030

Идентификация подводных объектов по оптическому изображению

А.В. Кузьменко¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Современные подводные аппараты всё чаще оснащаются системами технического зрения (СТЗ). Это позволяет им решать сложные задачи, связанные с распознаванием образов и классификацией. Целью данной работы является описание способа идентификации подводных объектов по оптическому изображению. В отечественной и зарубежной литературе практически отсутствует описание автономных систем, решающих данную задачу, что делает представленную работу актуальной. В статье обоснована целесообразность использования систем технического зрения необитаемого подводного аппарата (НПА) в задачах идентификации подводных объектов. Показана необходимость компьютерного моделирования процесса идентификации объектов на изображении, описан опыт создания базы изображений. В статье приведено описание идентификационных признаков объектов на изображении. Представлен набор признаков, позволяющих идентифицировать внешне похожие объекты с высокой вероятностью. Описан опыт создания программной модели идентификации подводных объектов по оптическому изображению.

Ключевые слова: система технического зрения, идентификация подводных объектов, признаки объектов на изображении, оптический диапазон, методы обработки.

Identification of underwater objects by optical image

Aleksandr V. Kuzmenko¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Many modern underwater vehicles are equipped with machine vision systems. This allows them to solve complex problems associated with pattern recognition and classification. The purpose of this work is to describe a method for identifying underwater objects from an optical image. In Russian and foreign literature, there is practically no description of autonomous systems that solve this problem, which makes the presented work relevant. The article substantiates the feasibility of using the technical vision systems of an autonomous underwater vehicle (AUV) in the identification of underwater objects. The article illustrates the necessity of computer modeling of the identifying objects process in an image. The experience of creating an image database is described. The article describes the identification features of objects in the image. A set of features that allows identifying externally similar objects with high probability is presented. The experience of creating a software model for identifying underwater objects from an optical image is described.

Keywords: computer vision system, image identification, image features, optical range, processing methods.

Введение

Морские мины являются оружием стратегического значения и нередко вытесняют на вторые роли остальные виды оружия. В военное время потеря даже одного боевого корабля может резко изменить оперативную обстановку в пользу противника.

Обнаружение донных мин является одной из наиболее актуальных и сложных задач подводной робототехники.

Одним из распространенных подходов к решению данной задачи является использование гидролокаторов бокового обзора. В работах зарубежных исследователей [1, 2, 3, 4] описан опыт обнаружения и классификации мин в автоматическом режиме. Важной частью данных работ является компьютерное моделирование работы системы и цифровая обработка гидроакустических изображений. Одним из основных классификационных признаков является величина и форма акустической тени. Представленные системы автоматического обнаружения и классификации морских донных объектов по изображениям, полученным с помощью гидролокаторов показывают результат, сопоставимый с результатом оператора для тех же изображений. Однако при работе с изображениями, полученными с помощью

гидролокатора, характерной является высокая вероятность ложной тревоги 12-64%, а при работе оператора – ещё выше [1].

Для обнаружения подводных объектов также могут быть использованы электромагнитные датчики. Подобные системы стоят на вооружении флота США [5].

В последнее время в состав автономных необитаемых подводных аппаратов всё чаще стали включать системы технического зрения, работающие в оптическом диапазоне. Опыт зарубежных исследователей показывает, что применение таких систем позволяет не только решать задачи обнаружения и классификации [6], но и идентификации донных мин [6, 7]. Оптические изображения имеют более высокую детализацию, что позволяет выделять больше характерных идентификационных признаков объектов, а появление малогабаритных высокопроизводительных встраиваемых систем, специализированных для обработки изображений в режиме реального времени, (например линейка Jetson компании Nvidia) открывает широкие перспективы для использования СТЗ на подводном роботе.

В связи с этим целью настоящей работы явилось создание программной модели-идентификатора

донных объектов по оптическому изображению. Основные задачи для реализации поставленной цели:

- создание базы изображений объектов;
- выбор признаков;
- выбор решающего правила.

Место данной работы среди прочих исследований заключается в расширении признакового пространства объектов на изображении и повышении надёжности идентификации.

1. Создание базы изображений подводных объектов

Задача идентификации подводных объектов осложняется отсутствием априорной информации о том, с какого ракурса производится съёмка объекта, и тем, что часть объекта может быть заилена. В связи с этим можно сделать вывод, что для успешной идентификации подводных объектов необходимо иметь большую выборку обучающих изображений.

Изображения донных мин либо отсутствуют в открытом доступе, либо встречаются крайне редко. В связи с этим, для поиска и тестирования идентификационных признаков в рамках данной работы, на основании данных, приведённых в открытых источниках [8], были созданы 3D-модели объектов в пакете AutoCAD и КОМПАС-3D. В общей сложности было создано 10 моделей, на каждую из которых было получено 60 изображений, учитывающих углы наклона, поворота, а также масштаб.

Полученные изображения были поровну разделены на обучающую и тестовую выборки. На рисунке 1, приведено изображение одной из созданных моделей.

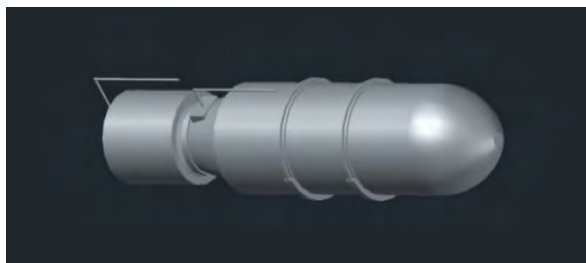


Рис. 1. 3D-модель мины АМД-2М

На морском дне лежит большое количество объектов, как естественных, так и искусственных, которые без использования СТЗ можно принять за опасный объект. Это могут быть камни, обломки кораблей и самолётов, металлические трубы, бочки, и т.д. В связи с этим в обучающую выборку также должны быть добавлены изображения безопасных объектов рис. 2



Рис. 2. 3D-модель бочки

Для придания выборке реалистичности, все изображения были искусственно зашумлены. Шумы на реальных изображениях в основном вызваны рассеянием света в водной среде и отражением. Для имитации рассеянного шума был применён гауссов шум, так как рассеянный шум имеет случайный характер с нормальным законом распределения. Для имитации помехи, вызванной отражением, на изображения был наложен шум типа: "Salt & Pepper" [9]. В разрабатываемой программной модели имеется возможность задания уровней зашумления, что в дальнейшем позволит обучить программу идентифицировать объекты в различных условиях.

Пример зашумлённого изображения приведён на рисунке 3.

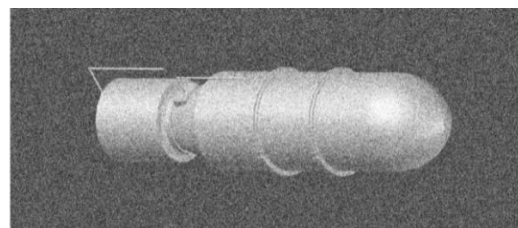


Рис. 3. Зашумлённое изображение мины АМД-2М

Полный список моделей объектов приведен в таблице 1.

Таблица 1

Список созданных моделей

Порядковый номер объекта	Название объекта
1	АМД-2М
2	бочка
3	АМД-500
4	ИГДМ
5	ИГДМ-500
6	МДМ1
7	МДМ2
8	МДМ3
9	МДТ
10	Murena

2. Признаки объектов на изображении

Для наглядной демонстрации описываемых признаков возьмем в качестве примера изображение, представленное на рисунке 4.



Рис. 4. Исходное изображение

1) Отношение эквивалентного диаметра объекта к длине максимальной оси инерции объекта.

2) Коэффициент заполнения. Данный признак представляет собой отношение площади объекта к площади ограничивающего прямоугольника (рис. 5).



Рис. 5. Ограничивающий прямоугольник

3) Следующим признаком является коэффициент выпуклости, который вычисляется, как отношение площади объекта к площади ограничивающего многоугольника (рис. 6).



Рис. 6. Ограничивающий многоугольник

4) Эксцентриситет эллипса с главными моментами инерции, равными главным моментам инерции объекта. Эксцентриситет характеризует степень сплюснутости объекта.

При вычислении ряда морфометрических признаков используются понятия механики твердого тела. В частности, это относится к длинам осей инерции объекта. Направления в теле, совпадающие с полуосями эллипсоида инерции, называют главными осями инерции.

Пусть N - количество пикселей, относящихся к объекту. Все множество пикселей $p(x, y)$, относящихся к объекту, обозначим Q . Тогда координаты центра масс объекта вычисляются как

$$x_c = \frac{1}{N} \cdot \sum_{p(x,y) \in \Omega} x \quad (1)$$

$$y_c = \frac{1}{N} \cdot \sum_{p(x,y) \in \Omega} y \quad (2)$$

Вычислим несколько вспомогательных величин:

$$U_x = \frac{1}{12} + \frac{1}{N} \cdot \sum_{p(x,y) \in \Omega} (x - x_c)^2 \quad (3)$$

$$U_y = \frac{1}{12} + \frac{1}{N} \cdot \sum_{p(x,y) \in \Omega} (y - y_c)^2$$

(4)

$$C = \sqrt{(U_x - U_y)^2 + 4 \cdot U_{xy}^2}$$

(5)

Тогда длины максимальной A_{\max} и минимальной A_{\min} осей инерции вычисляются как:

$$A_{\max} = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{U_x + U_y + C}$$

(6)

$$A_{\min} = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{U_x + U_y - C}$$

(7)

Длины главных осей инерции используются для вычисления эксцентриситета и ориентации объекта.

Эксцентриситет определяется с помощью соотношения [10]

$$E = \frac{2 \cdot \sqrt{(0.5 \cdot A_{\max})^2 - (0.5 \cdot A_{\min})^2}}{A_{\max}}$$

(8)

5) Отношение площади объекта к его периметру. Под площадью объекта на изображении понимается количество пикселей на бинарном изображении, которые принадлежат данному объекту. Периметр объекта вычисляется по формулам векторной алгебры, где в качестве входных параметров применяются координаты пикселей, принадлежащих контуру объекта

6 – 7) Сигнатурные признаки

Сигнатура есть описание границы объекта с помощью одномерной функции, которая может строиться различными способами. Один из простейших методов состоит в нахождении зависимости расстояния от центра (т.е. некоторой средней точки объекта, например, от его центра тяжести) до границы объекта в виде функции угла. Независимо от способа построения сигнатуры, основная идея состоит в том, чтобы свести представление границы к одномерной функции, которую предположительно описать легче, чем исходную двумерную границу. Сигнатуры, построенные описанным выше способом, инвариантны по отношению к параллельному переносу, однако они зависят от поворота и изменения масштаба. На рисунках 7 и 8 приведен объект и его сигнатура.



Рис. 7. Объект

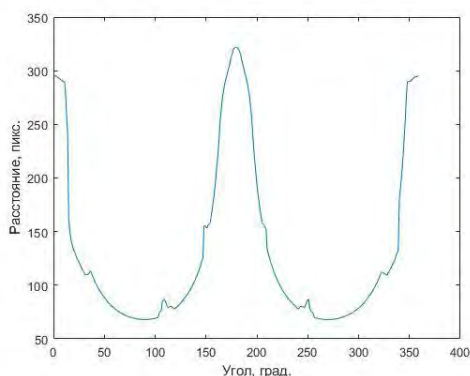


Рис. 8. Сигнатура объекта

В качестве 6-го признака было принято отношение максимального удаления границы объекта от центра масс к длине максимальной оси инерции объекта.

Седьмой признак – это отношение медианного значения к математическому ожиданию сигнатуры объекта.

8 – 14) Инварианты моментов

Двумерный момент порядка (p+q) цифрового изображения $f(x, y)$ определяются по формуле

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y) \quad (9)$$

При $p, q = 0, 1, 2, \dots$, где суммирование производится по всем значениям пространственных координат x и y данного изображения. Соответствующий центральный момент задается выражением

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad (10)$$

где

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad (11)$$

$$\bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (12)$$

По определению, нормированным центральным моментом порядка (p+q) называется величина

$$n_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\gamma} \quad (13)$$

При $p, q = 0, 1, 2, \dots$, где

$$\gamma = \frac{p+q}{2} + 1 \quad (14)$$

При $p+q = 2, 3, \dots$

Имея все эти моменты, можно определить следующие семь инвариантов моментов, которые инвариантны относительно переносов, осевой симметрии, поворотов, а также растяжений и сжатий [6]:

$$\phi_1 = n_{20} + n_{02} \quad (15)$$

$$\phi_2 = (n_{20} - n_{02})^2 + 4n_{11}^2 \quad (16)$$

$$\phi_3 = (n_{30} - 3n_{12})^2 + (3n_{21} - n_{03})^2 \quad (17)$$

$$\phi_4 = (n_{30} + n_{12})^2 + (n_{21} + n_{03})^2 \quad (18)$$

$$\phi_5 = (n_{30} - 3n_{12})(n_{30} + n_{12})[(n_{30} + n_{12})^2 - 3(n_{21} + n_{03})^2] + (3n_{21} - n_{03})(n_{21} + n_{03}) \cdot [3(n_{30} + n_{12})^2 - (n_{21} + n_{03})^2] \quad (19)$$

$$\phi_6 = (n_{20} - n_{02})[(n_{30} + n_{12})^2 - (n_{21} + n_{03})^2] + 4n_{11}(n_{30} + n_{12})(n_{21} + n_{03}) \quad (20)$$

$$\phi_7 = (n_{21} - n_{03})(n_{30} + n_{12})[(n_{30} + n_{12})^2 - [3(n_{30} + n_{12})^2 - (n_{21} + n_{03})^2]] \quad (21)$$

3. Решающее правило

Одним из возможных путей идентификации неизвестного вектора x заключается в нахождении образца, ближайшего к неизвестному, и определении класса, к которому он относится. Такой подход называется классификацией по ближайшему соседу.

Расстояние до ближайшего соседа можно определить с помощью расстояния Евклида.

Евклидово расстояние – геометрическое расстояние в многомерном пространстве признаков, которое вычисляется следующим образом:

$$d_{ab} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ai} - x_{bi})^2} \quad (22)$$

где a и b – точки в n -мерном пространстве, i – порядковый номер признака,

x_{ai} и x_{bi} – координаты точек a и b по признаку i .

Эффективность данного метода должна пропорционально возрастать с увеличением числа обучающих изображений, однако вместе с тем пропорционально увеличивается и вычислительная затратность данного алгоритма [11, 12].

4. Результаты моделирования

Для проверки эффективности представленного набора признаков было проведено компьютерного моделирования с помощью пакета прикладных программ Matlab с использованием ранее созданных изображений.

На первом этапе была проведена обработка обучающей выборки изображений, которая включала в себя следующие основные операции:

- медианная фильтрация для сглаживания шумов;
- повышение контраста методом эквализации гистограммы распределения яркостей;
- сегментация границ методом Канны для выделения интересующих областей, в частности, контура объекта;
- морфологическая обработка изображения для устранения шумов;
- вычисление соответствующих коэффициентов для каждого из 14 рассмотренных признаков.

Таким образом, для каждого из 10 идентифицируемых объектов было обработано по 30 изображений и, соответственно, получено по 30 векторов размером 1×14 с вычисленными значениями коэффициентов признаков.

Для получения усредненных значений коэффициентов признаков для каждого идентифицируемого объекта по 30 точкам было вычислено математическое ожидание, что позволило сформировать по одному усредненному вектору для каждого объекта.

На втором этапе было проведено исследование взаимозависимости рассмотренных признаков, для чего была построена ковариационная матрица, представленная в таблице 2.

Из таблицы видно, что высокую взаимную корреляцию (>85%) имеют несколько групп признаков:

- 1) Признаки с номерами 1, 4, 8, 9;
- 2) Признаки с номерами 10, 11, 12, 13, 14.

Из каждой группы необходимо выбрать только один признак, который войдет в итоговый вектор разрабатываемой модели. Выбор осуществлялся в пользу признака с наименьшим разбросом параметров для одного объекта, так как это свойство говорит о большей инвариантности признака к ракурсу и дистанции съемки.

В результате вектор признаков был сокращен в два раза с 14 до 7, и теперь в нем остались признаки с номерами 2, 3, 5, 6, 7, 9, 13.

Третьим этапом стала проверка работоспособности модели на тестовых

изображениях. Предварительная обработка тестовых изображений отличалась от обработки обучающей выборки только отсутствием усреднения, так как задача состояла в идентификации по одному изображению. После вычисления вектора признаков для текущего изображения, программа вычисляла расстояния Евклида до каждого из 10 векторов, полученных на этапе обучения, и выдавала номер ближайшего объекта. Если номер совпадал с номером тестового объекта, то идентификация считалась успешной.

Таблица 2

Ковариационная матрица признаков

Номер признака	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1,00	0,19	0,31	0,96	0,40	0,64	0,67	1,00	1,00	0,59	0,61	0,60	0,59	0,61
2	0,19	1,00	0,18	0,15	0,08	0,32	0,30	0,19	0,18	0,46	0,33	0,36	0,33	0,39
3	0,31	0,18	1,00	0,11	0,17	0,52	0,31	0,36	0,27	0,24	0,25	0,25	0,20	0,24
4	0,96	0,15	0,11	1,00	0,38	0,55	0,62	0,94	0,98	0,50	0,50	0,48	0,47	0,50
5	0,40	0,08	0,17	0,38	1,00	0,15	0,71	0,41	0,40	0,27	0,21	0,23	0,22	0,21
6	0,64	0,32	0,52	0,55	0,15	1,00	0,42	0,66	0,63	0,74	0,71	0,66	0,61	0,74
7	0,67	0,30	0,31	0,62	0,71	0,42	1,00	0,67	0,66	0,46	0,44	0,45	0,44	0,44
8	1,00	0,19	0,36	0,94	0,41	0,66	0,67	1,00	0,99	0,61	0,64	0,63	0,61	0,63
9	1,00	0,18	0,27	0,98	0,40	0,63	0,66	0,99	1,00	0,58	0,59	0,58	0,57	0,59
10	0,59	0,46	0,24	0,50	0,27	0,74	0,46	0,61	0,58	1,00	0,94	0,93	0,89	0,96
11	0,61	0,33	0,25	0,50	0,21	0,71	0,44	0,64	0,59	0,94	1,00	0,98	0,97	0,99
12	0,60	0,36	0,25	0,48	0,23	0,66	0,45	0,63	0,58	0,93	0,98	1,00	0,99	0,97
13	0,59	0,33	0,20	0,47	0,22	0,61	0,44	0,61	0,57	0,89	0,97	0,99	1,00	0,95
14	0,61	0,39	0,24	0,50	0,21	0,74	0,44	0,63	0,59	0,96	0,99	0,97	0,95	1,00

На завершающем этапе моделирования был произведен подбор весовых коэффициентов для каждого признака, путём перебора всех возможных значений с шагом 0.1 и вычисления результатов идентификации. В результате такого анализа было выявлено, что наилучшего результата удастся достичь при нулевом весовом коэффициенте для признака под номером 7. Из чего был сделан вывод об отсутствии информативности данного признака. Итоговый вектор признаков включает в себя признаки с номерами 2, 3, 5, 6, 9, 13.

Результаты моделирования приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты идентификации

Вариант моделирования	Успешная идентификация, %
Полный набор признаков	75,33
Усеченный набор признаков	78,67
Усеченный набор с весовыми коэффициентами	95,67

Заключение

Созданные 3D-модели морских мин позволили создать базу из 600 изображений. Несмотря на то, что смоделированные изображения могут сильно отличаться от реальных изображений мин, полученных с подводной видеокамеры, компьютерное моделирование является весьма полезным, так как позволяет протестировать идентификационные признаки.

Рассмотренные признаки показали свою эффективность при идентификации созданных моделей морских мин. Результаты моделирования показали, что редукция вектора признаков и подбор весовых коэффициентов дают существенное увеличение вероятности успешной идентификации (с 75,33% до 95,67%).

Также стоит отметить, что рассмотренные в работе донные мины имеют очень схожую конструкцию, что делает процесс идентификации более сложным.

Открытыми для будущих исследований остаются вопросы идентификации заиленных донных объектов, рассмотрения других решающих правил идентификации взамен расстояния Евклида и расширение списка идентифицируемых объектов.

Литература

1. Dobeck G., Hyland J., Automated Detection/Classification of Sea Mines in Sonar Image. Naval Surface Warfare Center, Dahigren Division. Coastal Systems Station. Panama City, Florida
2. Dobeck G., Hyland J., Sea mine detection and classification using side-looking sonar. Naval Surface Warfare Center, Dahigren Division. Coastal Systems Station. Panama City, Florida 72407-7001
3. K'ohntopp D., Lehmann B., Kraus D., Classification and Localization of Naval Mines With Superellipse Active Contours. IEEE Journal Of Oceanic Engineering.
4. Groen J., Coiras E., Del Rio Vera J., Evans B., Model-based sea mine classification with synthetic aperture sonar. IET Radar, Sonar and Navigation.
5. Clem T., Progress in Magnetic Sensor Technology for Sea Mine Detection. Coastal Systems Station, Dahlgren Division, Naval Surface Warfare Center, Panama City. FL 72407.
6. Busck, J.. Optical identification of sea-mines - Gated viewing three-dimensional laser radar. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark.
7. Leonard I., Alfalou A., Brosseau C., Sensitive test for sea mine identification based on polarization-aided image processing.
8. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Сидоренков В.В., Подводные роботы в минной войне: Монография. – Калининград: ОАО «Янтарный сказ», 2008.
9. Показеев К.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д., Оптика океана. МГУ им. М.В. Ломоносова 2010 г.
10. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: В 2 т. М.: Мир, 1982.
11. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С., Цифровая обработка изображений в среде Matlab. Техносфера, Москва 2006.
12. Хорн Б.К.П., Зрение роботов, Мир, Москва 1989.

References

1. Dobeck G., Hyland J., Automated Detection/Classification of Sea Mines in Sonar Image. Naval Surface Warfare Center, Dahigren Division. Coastal Systems Station. Panama City, Florida
2. Dobeck G., Hyland J., Sea mine detection and classification using side-looking sonar. Naval Surface Warfare Center, Dahigren Division. Coastal Systems Station. Panama City, Florida 72407-7001
3. K'ohntopp D., Lehmann B., Kraus D., Classification and Localization of Naval Mines With Superellipse Active Contours. IEEE Journal Of Oceanic Engineering.
4. Groen J., Coiras E., Del Rio Vera J., Evans B., Model-based sea mine classification with synthetic aperture sonar. IET Radar, Sonar and Navigation.
5. Clem T., Progress in Magnetic Sensor Technology for Sea Mine Detection. Coastal Systems Station, Dahlgren Division, Naval Surface Warfare Center, Panama City. FL 72407.
6. Busck, J.. Optical identification of sea-mines - Gated viewing three-dimensional laser radar. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark.
7. Leonard I., Alfalou A., Brosseau C., Sensitive test for sea mine identification based on polarization-aided image processing.
8. Illarionov G.Ju., Sidenko K.S., Sidorenkov V.V., Podvodnye roboty v minnoj vojne [Underwater robots in the mine war].: Monografija. – Kaliningrad: ОАО «Jantarnyj skaz», 2008.
9. Pokazeev K.V., Chaplina T.O., Chashechkin Ju.D., Optika okeana [Ocean optics]. MGU im. M.V. Lomonosova 2010 g.
10. Prjett U. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij [Digital image processing]: V 2 t. M.: Mir, 1982.
11. Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing] M.: Tekhnosfera, 2006
12. Horn B.K.P., Zrenie robotov [Robot vision], Mir, Moskva 1989.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Владимирович Кузьменко, ассистент кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: kav0221@mail.ru

Aleksandr V. Kuzmenko, assistant of the Department of marine information systems and technologies, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kav0221@mail.ru

УДК 629.584
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.031

Обработка и анализ подводных спектрозональных изображений

Н.В. Игнатьева¹, И.К. Голубев¹, Д.А. Смольский¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Одним из приоритетных направлений эффективного освоения водного пространства на сегодня можно обозначить поиск и обнаружение различных объектов, расположенных в прибрежных и глубоководных областях морских бассейнов, в частности залежей полезных ископаемых и минералов. Решение данной задачи возможно путем обработки и анализа изображений морского дна, с использованием различных алгоритмических и математических методов, реализованных в форме программ и приложений, исполняемых на современных вычислительных машинах и персональных компьютерах. Одним из путей реализации проектов, направленных на решение подобной задачи может стать проектирование необитаемых подводных аппаратов (НПА), которые будут выступать в качестве средства получения изображений высокого качества, используемых для последующей обработки с использованием соответствующего программного обеспечения. В статье приведена процедура обработки сложно-структурных (текстурных) изображений залежей полезных ископаемых на фоне морского дна, показана эффективность использования спектральных и цветовых параметров исследуемых изображений в задачах распознавания и измерения характеристик этих залежей. Процедура обработки, реализованная на базе анализа цветового содержания сюжетов и разработанное программное обеспечение НПА, позволили идентифицировать наличие выходов минералов на морском дне, а также оценить их пространственные (геометрические) характеристики, в частности, площадь. Апробация разработанной программы была проведена на искусственно созданных модельных изображениях, а также на реальных подводных изображениях полезных ископаемых.

Ключевые слова: НПА, программное обеспечение, оптический диапазон, анализ цветовых характеристик видеоизображений, обработка подводных спектрозональных изображений.

Processing and analysis of underwater multispectral images

Natalia V. Ignatieva¹, Ilya K. Golubev¹, Dmitry A. Smolskiy¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. One of the priorities in today's effective global Ocean exploration can be stated, such as designing the methods of search and detection varieties of objects located in the coastal or deep-sea areas of marine basins, one of such objects can for example be minerals scattered along the sea floor. Accomplishment of this task is possible through processing and analyzing images of the seabed, using various algorithmic and mathematical methods implemented in the form of programs and applications which will be executed using computing devices. One of the ways of implementing such projects might become a designing an uninhabited underwater vehicle (UUV), which will act as a means of obtaining high-quality images used for subsequent processing in appropriate software.

The current article contains description of operations of analyzing and processing structural images depicting minerals scattered along the sea floor. It shows the level of efficiency in use of spectral and color matching parameters applied to task of recognition and measurement underwater minerals on the examined images.

Processing procedure and its software implementation, completed using the analysis of assemblies and its color content, allowed us to identify layout of the minerals along the sea floor, as well as estimate its spatial (geometric) properties such as amount of its quantity. Testing of the developed application was performed over the simulated images, as well as real images depicting underwater mineral clusters.

Keywords: UUV, software application, optical scale, color matching properties of digital images, processing of underwater multispectral images.

Введение

В контексте освоения водного пространства можно выделить задачу создания комплекса технических решений, предназначенного для поиска, обнаружения и классификации подводных объектов и ресурсов, залегающих в глубинных и приповерхностных подводных областях океанических и морских бассейнов.

Это задача делится на две подзадачи, несомненно связанные между собой, но требующие для своего решения множество различных подходов. Так, задачу поиска и обнаружения точного местоположения подводного объекта невозможно реализовать без использования специализированной технической платформы – необитаемых подводных аппаратов, оснащенных полным спектром различных датчиков, включая комплекс систем технического зрения,

обеспечивающих аналогично зрительному анализатору уверенную регистрацию информации в оптическом диапазоне спектра. Одновременно задача анализа полученных данных должна решаться путем разработки эффективных алгоритмов обработки с использованием современных программных средств.

Совершенствование методов обработки подводных изображений идет по пути создания наиболее эффективного признакового описания исследуемых сюжетов при решении конкретных прикладных задач. Расширение признакового описания связано с использованием спектрозональных характеристик подводных изображений, в частности, их цветовых параметров, что характерно для залежей полезных ископаемых, расположенных на неоднородном по текстуре морском дне.

Целью данной работы является разработка программного обеспечения НПА, предназначенного для решения задачи обнаружения, выделения, распознавания и оценки параметров сложно-структурных спектральных изображений, в частности, залежей полезных ископаемых. Для ее реализации, на каждом из этапов разработки и проектирования, был привлечен и рассмотрен широкий спектр математических и алгоритмических методов таких, как: бинаризация, методы морфологического размыкания и замыкания, дилатация и другие [1].

Описание процедуры обработки и анализа изображений

Процесс обработки и анализа большинства подводных изображений, в основном, базируется на использовании таких отличительных признаков объектов, как яркостные, геометрические или контурные признаки, особенно в тех случаях, когда решаются проблемы обнаружения и анализа одиночных объектов. В случае же решения задачи идентификации сложно-структурных, текстурных изображений, к которым относятся выходы полезных ископаемых на поверхность морского дна, в целях повышения надежности обнаружения и распознавания этого класса изображений весьма эффективно использование спектральных свойств излучения (отражения, поглощения) фрагментов изображений [2]. Исследование спектральных свойств исследуемых изображений и их математическая интерпретация в виде цветовых характеристик реализуется с помощью видеодатчиков, входящих в состав модуля системы технического зрения НПА.

Поскольку рассматриваемый в статье класс изображений относится к текстурным, причем с переменными параметрами по цвету, то алгоритмическое обеспечение системы обработки изображений морского дна предполагает процедуру текстурной сегментации по цветовым признакам. В этом случае в качестве рабочего пространства признаков используется цветовое пространство, в котором отображается цветовое содержание (цветовая палитра) исследуемого класса изображений.

Цветовое пространство, используемое в работе, построено по аддитивной схеме RGB, которое базируется на трёхмерной модели, а значит любой цвет, входящий в палитру, может быть однозначно определён индивидуальным набором из трёх координат цвета [3].

Если имеем изображение морского дна с участками отличными от фона и содержащими изображения залежей полезных ископаемых, то пиксели, принадлежащие всему изображению, будут распределены в цветовом пространстве в виде точек, которые образуют локальную область. Эта область представляет собой цветовую, пиксельную характеристику изображения, называемую цветовым охватом изображения [4].

В пределах этой же области находятся пиксели, принадлежащие искомому объекту, которые характеризуют цветовую палитру фрагмента изображения отражающие залежи полезных ископаемых. (Рис. 1).

Задача обнаружения и распознавания определенного класса изображений состоит в том, что необходимо определить, какие цветовые пиксели принадлежат искомому объекту, а какие являются фоновыми или принадлежат любому другому объекту.

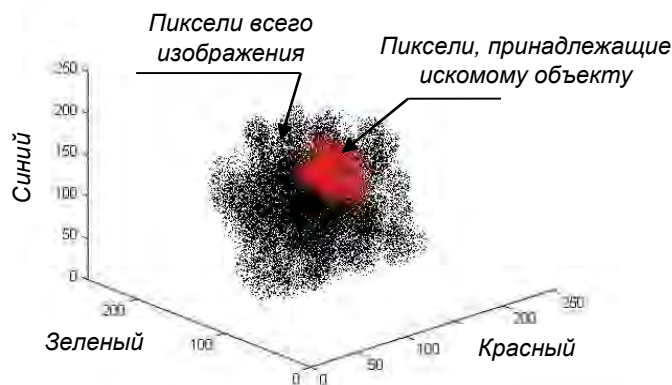


Рис. 1. Пример разброса пикселей изображения в цветовом пространстве RGB.

На предварительном этапе обработки на изображении выделяется область, которая используется в качестве классификационного шаблона для данного класса изображений.

Следующим этапом является проверка классификационного шаблона на наличие пикселей с одинаковыми цветовыми свойствами, с целью их дальнейшего исключения из процесса обработки, а также усреднение полученного шаблона по цветовым компонентам пикселей изображения.

Этапы работы с классификационным шаблоном описываются следующим образом:

Сумма каждого из цветов всех пикселей шаблона вычисляется:

$$\text{sum}(R,G,B) = \sum_{i=1}^P (R_i, G_i, B_i) \quad (1)$$

R, G, B – величина каждой монохромной компоненты любого пикселя шаблона; P – количество пикселей шаблона.

Отклонение компонент каждого последующего пикселя от таковых предыдущего пикселя:

$$\text{Otc}(R, G, B)_{1..P} = \sqrt{((R_i, G_i, B_i) - (R_{i-1}, G_{i-1}, B_{i-1}))^2} \quad (2)$$

Суммируем полученные значения из формулы (2):

$$\text{sumOtc}(R, G, B) = \sum_{i=1}^P \text{Otc}(R, G, B) \quad (3)$$

Среднее отклонение для каждого из цветов пикселей шаблона составит:

$$\text{SOtc}(R, G, B) = \frac{\text{sumOtc}(R, G, B)}{P} \quad (4)$$

Среднее значение каждого из цветов пикселей шаблона составит:

$$\text{SredA}(R, G, B) = \frac{\text{sum}(R, G, B)}{P} \quad (5)$$

Отклонение каждого из цветов любого из пикселей от среднего значения отклонения:

$$\text{I}(R, G, B)_{1..P} = \sqrt{(\text{SredA}(R, G, B) - (R_i, G_i, B_i))^2} \quad (6)$$

Далее исключаются те пиксели, значения величин монохромных компонент которых, хотя бы по 2-м из них превышают значение O_{tcl} более, чем в $kfcO_{tcl}$ раз:

$$kfc(R, G, B) = S_{red}A(R, G, B) * kfcO_{tcl}kfcR < IR_p \wedge kfcG < IG_p \vee kfcR < IR_p \wedge kfcB < IB_p \vee kfcG < IG_p \wedge kfcB < IB_p \rightarrow (R, G, B)_p \in P_{usred} \quad (7)$$

Где $kfcO_{tcl}$ – величина, позволяющая корректировать степень усреднения путем увеличения либо уменьшения порога усреднения; P_{usred} – усредненный шаблон.

Далее производится поочередное сравнение пикселей выделенного шаблона с пикселями всего изображения. При совпадении цветов пиксель будет считаться принадлежащим искомому объекту и выделяться. Выделение происходит путем бинаризации, где каждый пиксель может быть представлен только одним из двух логических состояний – принадлежащим, либо не принадлежащим шаблону. Согласно выражению (8):

$$P_{usred}(R, G, B)_i = \text{image}(R, G, B)_{1..n} \rightarrow M_i = \text{true} \quad (8)$$

Где n – количество пикселей изображения, M – логическая матрица, хранящая адреса пикселей изображения, принадлежащих шаблону.

Далее к бинарному изображению применяются операции морфологического замыкания и размыкания, используемые при работе со множествами с целью формирования областей на бинарном изображении, основываясь на группировании наиболее крупных скоплений выделенных пикселей.

Замыкание:

$$bw = (M \oplus \text{strel}) \ominus \text{strel} \quad (9)$$

где: strel – структурообразующий элемент; bw – замкнутое множество.

Размыкание:

$$bw2 = (bw \ominus \text{strel}) \oplus \text{strel} \quad (10)$$

где: $bw2$ – разомкнутое множество.

Далее происходит выделение контуров искомого объекта, с применением операций дилатации и выделения границ, для большей наглядности, и визуализации полученного результата.

Дилатация:

$$bw3 = bw2 \oplus \text{strel} \quad (11)$$

где $bw3$ – множество, к которому применена дилатация.

Операция морфологического замыкания дает возможность выделения границ бинарных объектов создает бинарное изображение, для которого значения различных пикселей исходного объекта установлены как 1, а значения остальных – 0. Пиксель считается граничным, если он равен 1 и хотя бы один из его соседей равен 0. Операция «наращивает» объекты согласно структурообразующему элементу.

Морфологическое размыкание позволяет нам удалять шумы и мелкие объекты, отделяя от множества всех объектов A маленькие отдельные

объекты множества B , сохраняя при этом массивы объектов множества B (Рис. 2) [1].

При помощи дилатации определяется множество всех перемещений, при которых множества B и A совпадают по меньшей мере в одном элементе [1].

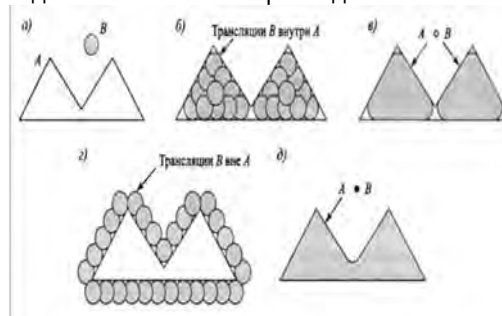


Рис. 2. Размыкание и замыкание структурообразующих элементов, а) Множество A и структурообразующий элемент B , б) Сдвиги B , которые полностью помещаются внутрь A , в) Полное размыкание A (затемненная область), г) Сдвиги B , которые лежат целиком вне A , д) Полное замыкание A (затемненная область).

Оценка пространственных (геометрических) характеристик

Важным моментом при обнаружении и определении класса подводных залежей полезных ископаемых является оценка их пространственных характеристик, в том числе, размеров, площадей, которые занимают эти залежи. В процессе определения площадей подводных изображений необходимо произвести расчет величины, характеризующей количество пикселей, приходящихся на один метр по высоте и по ширине для исходного изображения, что в дальнейшем позволит и оценить размеры залежей полезных ископаемых, осуществив привязку к местности. Решение этой задачи связано с определением углов обзора α видеокамеры с учетом ее основных характеристик при заданном расстоянии от камеры до поверхности морского дна:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg(m/2F), \quad (12)$$

где: m – размер ПЗС матрицы мм, F – фокусное расстояние мм.

Далее определяется количество пикселей, приходящихся на один метр:

$$d = \frac{p \cdot 2 \cdot \tg(\frac{\alpha}{2})}{Y} \quad (13)$$

где: Y – расстояние от видеокамеры до снимаемой поверхности в метрах, p – разрешающая способность ПЗС матрицы в пикселях.

Зная количество пикселей, приходящихся на 1 м по горизонтали и вертикали, площадь искомого объекта в квадратных метрах определяется как: $m = S/D$, где D – плотность пикселей на метр квадратный, вычисляемая как квадрат среднего значения количества пикселей, приходящихся на 1 м по горизонтали и вертикали; S – площадь искомого минерала в пикселях [5].

Результаты экспериментальных исследований

Для апробации процедуры обработки изображений было проведено несколько модельных

экспериментов, учитывающих степень влияния свойств водной среды, условия съемки и используемые видеокамеры на результаты анализа. С целью обработки изображений, полученных в ходе экспериментов, разработан программно-алгоритмический модуль на языке высокого уровня технических и научных вычислений в среде матрично-ориентированной системы MATLAB на основе популярного пакета Image Processing Toolbox.

Для тестирования программного модуля НПА использованы изображения выходов минералов на поверхность морского дна, полученные путем имитации естественных условий морской среды, а также пример подводного изображения выхода золотой руды.

С помощью цифровой видеосъемки были получены несколько серий изображений, снятых на разных расстояниях от объектива видеокамеры до объекта, с применением различных фильтров. Минерал, который был использован в качестве объекта поиска - морской янтарь. Была определена и зафиксирована суммарная площадь используемых минералов, которая составила около 4,5 см².

Съемка велась на расстояниях L в диапазоне 20-50 см от камеры до поверхности, на которой располагался исследуемый объект. Характеристики используемой камеры: разрешение - 12Мп, размер матрицы - 2160x1080, фокусное расстояние линзы - $f/1,8$. В 4 серии эксперимента для сравнения была использована камера с разрешением - 8Мп, размером матрицы - 1080x720, фокусным расстоянием линзы - $f/1,8$.

Результаты обработки серии исследуемых изображений приведены ниже на рисунках 3,4,5 и 6.

Для каждой серии (рисунки 3,4,5 и 6) продемонстрированы исходные изображения (слева) и результаты обработки изображений (справа). Буквенные обозначения а,б,в,г соответствуют расстояниям $L = 20, 30, 40, 50$ см соответственно.

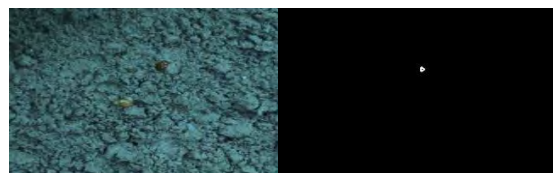
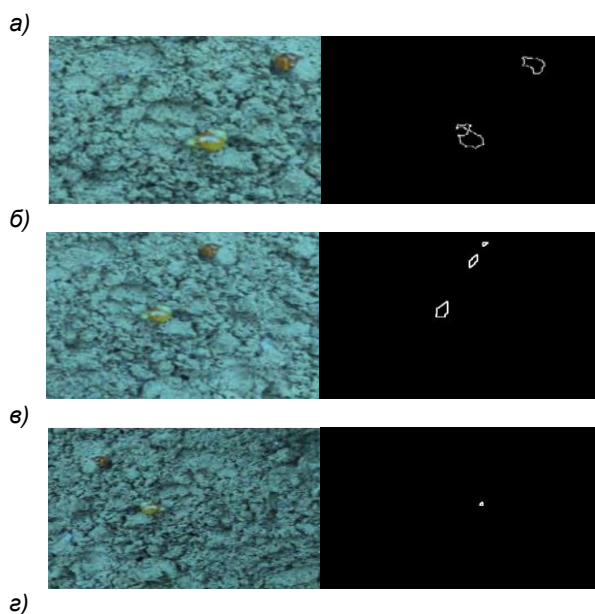


Рис. 3. Серия 1 - модельные изображения, имитирующие морское дно, в водах бассейнов с малым содержанием примесей и взвешенных частиц (имитируемое количество - от 0.1 до 3 мг/л), а) $L = 20$, б) $L = 30$, в) $L = 40$, г) $L = 50$ см.

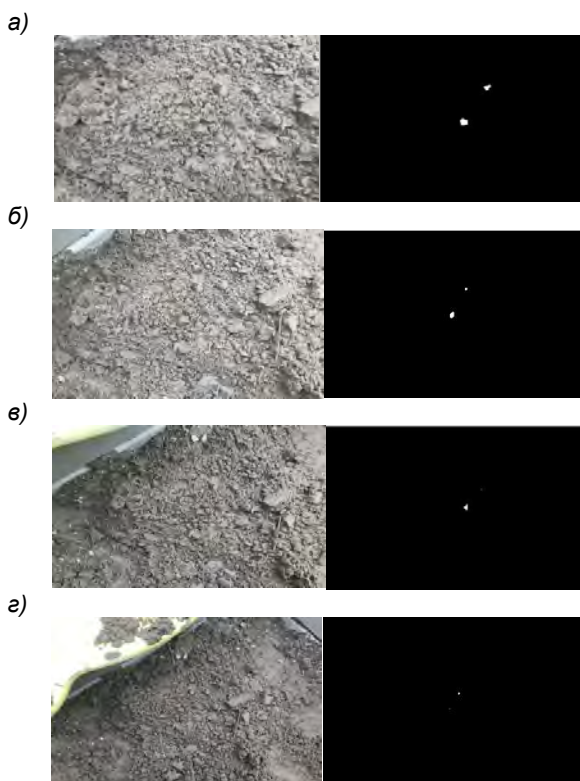


Рис. 4. Серия 2 - модельные изображения, с наложением частотных фильтров и применением цветowych фильтров для водоемов с малым содержанием примесей и взвешенных частиц (см. Серию 1), а) $L = 20$, б) $L = 30$, в) $L = 40$, г) $L = 50$ см.

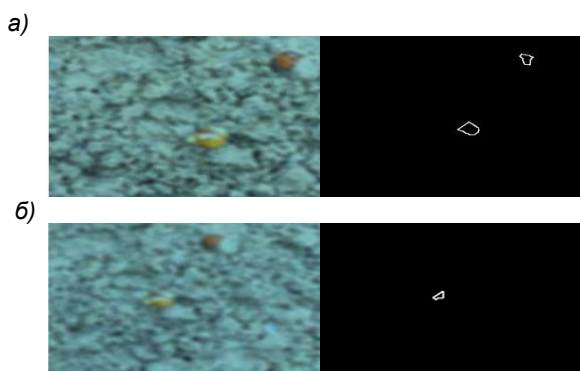




Рис. 5. Серия 3 - модельные изображения, имитирующие морское дно в водах акваторий с высоким содержанием примесей и взвешенных частиц (имитируемое количество – от 3 до 11 мг/л), а) L=20, б) L = 30, в) L = 40, г) L = 50 см.

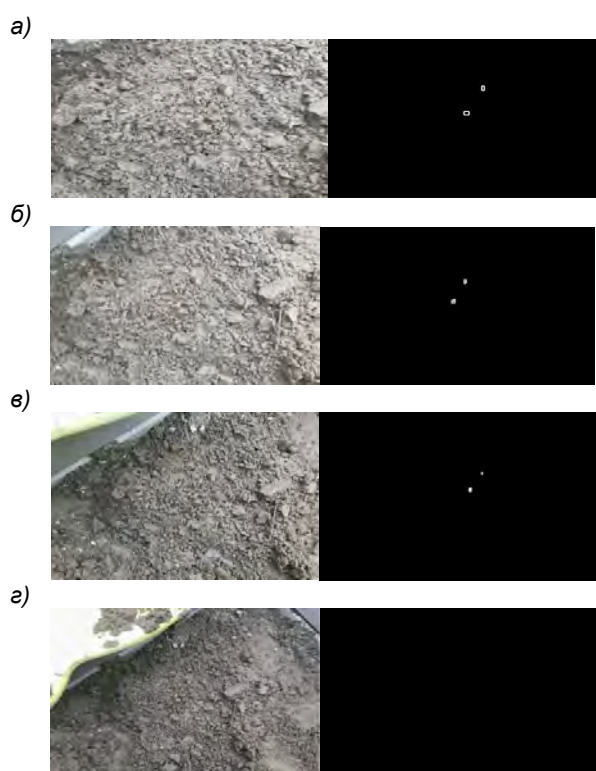


Рис. 6. Серия 4 - модельные изображения, с наложением частотных фильтров и применение цветных фильтров для акваторий с высоким содержанием примесей и взвешенных частиц (см. Серию 3), а) L=20, б) L = 30, в) L = 40, г) L = 50 см.

При проведении эксперимента стояла задача обнаружить и оценить истинную площадь исследуемых полезных ископаемых в разных условиях регистрации изображений исследуемых объектов, в частности, в акваториях, имитирующих различную прозрачность водной среды, а также оценить влияние характеристик видеокамеры на результаты обработки. Результаты экспериментов представлены на рис. 7, 8 и 9.

Зависимость регистрируемой площади объекта в условиях «прозрачной» и «загрязненной» водной среды от расстояния L съемки поверхности морского дна с учетом коррекции искажающих спектральных

свойств воды и для разных камер приведены на рис.7.

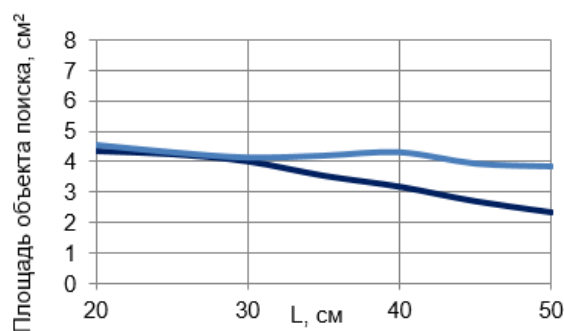


Рис. 7. Результаты оценки площади для разных характеристик камер, где голубым цветом показана Серия 2, синим – Серия 4.

Зависимость регистрируемой площади объекта в условиях «прозрачной» и «загрязненной» водной среды от расстояния L съемки поверхности морского дна без коррекции искажающих спектральных свойств воды приведены на рис.8.

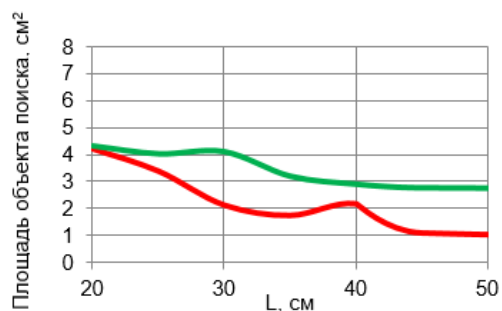


Рис. 8. Результаты оценки площади без коррекции искажающих спектральных свойств воды, где зеленым цветом показана Серия 1, красным - Серия 3.

Графики на рисунке 8 иллюстрируют влияние спектральных (цветовых) характеристик водной среды [6], [7] и параметров видеокамер на результаты оценки пространственных характеристик исследуемых изображений.

На рис.9 приведена сводная диаграмма, отражающая результаты обработки исследуемых сюжетов и определения пространственных характеристик изображений всех четырех экспериментов.

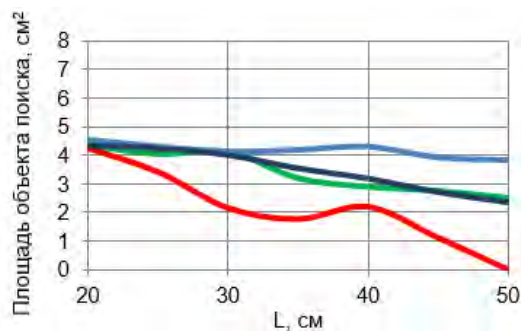


Рис. 9. Сводная диаграмма, где зеленым цветом показана Серия 1, голубым – Серия 2, красным – Серия 3, синим – Серия 4.

Как видно из приведенной сводной диаграммы и результатов обработки (рис.4) наиболее точный результат обнаружения и оценки площади искомым минералов достигается во 2 серии экспериментов при использовании даже стандартной видеокамеры с разрешением 12Мп и предварительной обработке с учетом коррекции искажающих спектральных свойств воды с применением частотной фильтрации и цветовой фильтрации. Удовлетворительные результаты наблюдаются и для случая с предобработкой для модельных изображений минералов, имитирующих загрязненные акватории (с высоким содержанием взвешенных частиц и примесей) в 4-й серии эксперимента при регистрации объектов съемки на расстоянии до 40 см.

Наглядным примером успешного обнаружения и оценки геометрических параметров залежей полезных ископаемых при помощи разработанных программных средств могут служить результаты обработки подводного изображения выхода золотой руды.



Рис. 10. Изображение выхода залежей золотой руды.



Рис. 11. Результат обработки изображения выхода залежей золотой руды

В результате обработки изображения выхода золотой руды был надежно выделен основной массив искомого объекта, несмотря на текстурную неоднородность, и близкий цветовой диапазон минерала, и окружающей его породы. Результат обработки представлен на рисунке 11.

В соответствии с приведенной выше процедурой определения пространственных характеристик исследуемых изображений полезных ископаемых, приведенных на рис.10 была определена площадь выхода золотой руды.

Проиллюстрируем приведенную выше методику примером расчета площадей обнаруженных участков изображений полезных ископаемых для камеры с характеристиками:

- Разрешение: 5Мп (2560 x 1920)
- Размер матрицы: 1/3" (4,52 x 3,39 мм)
- Фокусное расстояние линзы: 12,0 мм.

Для выбранной камеры углы обзора по горизонтали и по вертикали составляют: $\alpha_1 \approx 21$ град., $\alpha_2 \approx 16$ град соответственно.

При расстоянии съемки от поверхности морского дна с залежами золотой руды до объектива видеокамеры равном 0,5 метрам площадь этих залежей составила 26075 пикселя в стандартах разложения, что соответствует согласно приведенной выше методике расчета - 120 см².

Таким образом приведенная процедура обработки и анализа изображений полезных ископаемых позволяет вычислить размеры площадей искомым объектов, выделенных с использованием спектральных (цветовых) признаков, согласно рассмотренной процедуре обработки при известных характеристиках используемой камеры и на заданном расстоянии от камеры до снимаемой поверхности

Заключение

Результаты, полученные по итогам экспериментальной части, наглядно демонстрируют перспективность разработки программного обеспечения модуля обработки изображений НПА, а в дальнейшем и видеопотока, с целью обнаружения выходов минералов и полезных ископаемых и определением их пространственных характеристик.

Была продемонстрирована и подтверждена эффективность работы программного модуля НПА в задачах поиска полезных ископаемых с использованием спектральных признаков объектов и применением стандартных видеокамер с разрешением не менее 12 Мп как в прозрачных, так и в загрязненных водах с содержанием примесей и взвешенных частиц превышающих 3мг/л. Достигнутые результаты обработки и анализа спектральнональных изображений были обеспечены с использованием предварительной обработки, включающей методы коррекции искажающих спектральных свойств воды, а также такие операции, как повышение контраста, частотная и цветочная фильтрация.

Следующим шагом в развитии подобных систем применительно к поиску полезных ископаемых можно обозначить создание программных и аппаратных средств, позволяющих учитывать изменение спектральных свойств искомым минералов под действием различных внешних факторов в реальном масштабе времени, а также применение систем искусственного освещения с заданными параметрами излучаемого спектра [7], которые помогут выделить искомым объект с известными оптическими свойствами.

Литература

1. Р. Вудс, Цифровая обработка изображений в среде Matlab. ТЕХНОСФЕРА. 2006;
2. Н.В.Лысенко, Н.В.Игнатъева. Спектральнональная обработка изображений в задачах экологического мониторинга, Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника", 2016., Вып.6, с. 32-37;
3. Быков Р. Е. Цифровые фильтры цветности в задачах обработки видеоизображений. Биотехносфера, № 3 (9)/2010, с.42-48;
4. Stephane Bazeille, Isabelle Quidu, Luc Jaulin. Identification of underwater man-made object using a colour criterion. HAL. 2007;
5. Вычисление плотности пикселей. Автор не указан. [Электронный ресурс] <http://sv-tech.ru/vychisleniye-plotnosti-pikseley/> (дата посещения 13.04.2019);

6. Безруков Ю.Ф. Океанология. Часть I. Физические явления и процессы в океане. Симферополь: Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского. 2006;
7. Chongyi Li, Runmin Cong. Underwater Image Enhancement by Dehazing With Minimum Information Loss and Histogram Distribution Prior. IEEE Transactions on Image Processing. 2016, Volume 25, Issue 12, p. 5664 – 5677.

References

1. WOODS, RICHARD E. Digital image processing using MATLAB. 1-e Edition, published by Pearson Education. 2004;
2. N. V. Lysenko, N. V. Ignatieva. Multispectral image processing in problems of environmental monitoring. Journal of the Russian universities. Radioelectronics. 2016, Issue 6, p. 32-37;
3. Bykov R. E. Digital color filters in video image processing problems. Biotechnosphere, no. 3 (9)/2010, p. 42-48;
4. Stephane Bazeille, Isabelle Quidu, Luc Jaulin. Identification of underwater man-made object using a colour criterion. HAL. 2007;
5. Calculation of pixel density. [Electronic resource] <http://lsv-tech.ru/vychisleniye-plotnosti-pikseley/> (date 13.04.2019)
6. Bezrukov Yu. F. Oceanology. Part I. Physical phenomena and processes in the ocean. Simferopol: V. I. Vernadsky Tauride national University. 2006;
7. Chongyi Li, Runmin Cong. Underwater Image Enhancement by Dehazing With Minimum Information Loss and Histogram Distribution Prior. IEEE Transactions on Image Processing. 2016, Volume 25, Issue 12, p. 5664 – 5677.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Игнатъева Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и видеотехники Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, кандидат технических наук, доцент кафедры морских информационных систем и технологий Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, peregudovanv@yandex.ru

Голубев Илья Капитонович, инженер-программист АО «СКБК», 198097, Санкт-Петербург, пр. Стачек, 47Ц, ilya.golubev.94@inbox.ru

Смольский Дмитрий Александрович, студент 1 курса магистратуры кафедры Морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, Кронверкский пр, д.5, инженер-конструктор АО «СКБК», 198097, Санкт-Петербург, пр. Стачек, 47Ц, dsmolskiy@mail.ru

Nataliya V. Ignatieva, PhD in Engineering Science, Associate Professor of the department of television and video equipment Electrotechnical University of Saint-Petersburg, 197376, St. Petersburg, Professora Popova, 5, PhD in Engineering Science, Associate Professor of the department of marine devices State marine technical university of Saint-Petersburg, 190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, peregudovanv@yandex.ru

Ilya K. Golubev, software engineer of JSC "SBDB", St. Petersburg, 198097, St. Petersburg, 47C Stachek Ave., ilya.golubev.94@inbox.ru

Dmitry A. Smolskiy, 1st year student of State marine technical university of Saint-Petersburg, 190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, design Engineer of JSC "SBDB", 198097, St. Petersburg, 47C Stachek Ave., dsmolskiy@mail.ru

УДК 681.883 : 519.2
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.056

Определение порогов селекции по уровню и длительности в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом

С.Б. Егоров¹, Р.И. Горбачев¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. «Выбросовая» вероятностная модель работы обнаружителя в режиме ожидания сигнала, предложенная авторами в [1], использована для оценки влияния селекции выбросов по длительности на вероятность ложной тревоги. Флюктуационные выбросы помехового индикаторного процесса, превысившие пороги селекции по уровню и длительности, трактуются как редкие события на интервале ожидания сигнала, подчиняющиеся вероятностному закону Пуассона. При условии, что средний период следования ложных выбросов превышает интервал корреляции индикаторного процесса, получено соотношение между средним числом выбросов любой длительности и средним числом выбросов, превысивших пороговую длительность. На основании известных числовых и вероятностных характеристик выбросов нормального стационарного случайного процесса получены уравнения, связывающие относительные пороги селекции по уровню и длительности с вероятностью ложной тревоги на интервале ожидания сигнала. Предложена методика определения порога селекции по длительности для снижения порога селекции по уровню до заданной величины.

Ключевые слова: обнаружение сигналов на фоне помех, автономный обнаружитель, статистическая модель обнаружителя, порог обнаружителя, селектор обнаружителя, индикаторный процесс обнаружителя, фильтрация ложных выбросов, селекция сигналов по уровню и длительности

Determination of level and time thresholds for detectors with normalized indicator process

Stanislav B. Egorov¹, Roman I. Gorbachev¹

¹State-marine technical university of Saint-Petersburg

Abstract. «Emissional» probability model of the detector in stand-by mode proposed by the authors in [1], is intended for estimation of false alarm rate dependence from the value of time-selection threshold. Fluctuation emissions of the noise indicator process are interpreted as rare events correspond to Poisson distribution. Assuming that average rate of false alarms exceeds the correlation interval of indicator process, obtained equation between average number of false alarms of any duration and average number of false alarms exceed the time threshold. Based on known numerical and statistical characteristics of emissions of normal stationary random process obtained equations, relating time and level thresholds with false alarm probability on stand-by mode time interval. Also suggested a method of determining time threshold intended to reduce level threshold.

Keywords: signal detection in noise, autonomous detector, statistical model of detector, detector's threshold, threshold selector in detector, detector's indicator process, false-alarm filtering, detection of signals by level

Введение

При обнаружении сигнала на фоне помех всегда имеет место интеграл времени, предшествующий появлению сигнала – интервал ожидания. При этом момент времени появления сигнала после начала ожидания не известен.

Чтобы не пропустить появление сигнала, в обнаружителе непрерывно, в режиме «скользящего окна», формируется «решающая статистика» – случайная величина, сравниваемая с порогом. Текущие значения решающей статистики образуют случайный процесс, непрерывно контролируемый по уровню с помощью порогового устройства.

Первый после начала ожидания флюктуационный выброс контролируемого («индикаторного») процесса выше порога вызывает ложное срабатывание обнаружителя, если при обнаружении не используются дополнительные отличительные признаки сигнала от помехи.

В таком режиме работы обнаружителя появление хотя бы одного выброса помехового индикаторного процесса («ложного выброса») на интервале ожидания эквивалентно появлению ложной тревоги.

Предложенная в [1] «выбросовая» вероятностная модель работы обнаружителя в режиме ожидания

сигнала отражает все особенности описанного выше процесса. В этой модели для определения порога селекции сигнала по уровню используются числовые характеристики выбросов помехового индикаторного процесса. При этом вероятность ложной тревоги задается на интервале ожидания сигнала, а не в «точке», в фиксированный момент времени.

На основании предложенной модели в [1] получены величины относительного порога

$$k_0 = \frac{u_0 - \mu_u}{\sigma_n},$$

обеспечивающие заданную вероятность ложной тревоги на различных интервалах ожидания. Они оказались значительно выше величин k_0 , полученных для тех же значений $P_{\text{ЛТ}}$, но заданных «в точке», и это превышение тем существеннее, чем протяженнее интервал ожидания сигнала.

Повышение относительного порога k_0 загроубляет обнаружитель, поэтому желательно его снижение, особенно при длительных режимах ожидания, когда он особенно велик.

Одним из возможных путей снижения порога селекции по уровню является привлечение дополнительного отличительного признака сигнала –

его длительности. Вводя селекцию сигнала по длительности, можно либо снизить вероятность ложной тревоги, либо достигнуть заданной величины $P_{\text{ЛТ}}$ при пониженном относительном пороге селекции по уровню.

«Выбросовая» вероятностная модель работы обнаружителя позволяет оценить влияние селекции выбросов по длительности на величину $P_{\text{ЛТ}}$ и предложить методику совместного выбора двух порогов (по уровню и длительности) при заданной вероятности ложной тревоги на заданном интервале ожидания сигнала. Целью данной статьи является теоретическое обоснование такой методики.

Вероятностная модель работы обнаружителя в режиме ожидания сигнала с селекцией ложных выбросов по длительности

Укрупненная структура обнаружителя с двумя селекторами сигнала в индикаторном устройстве представлена на рис. 1.

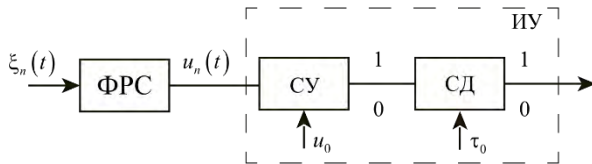


Рис. 1. Двухселекторный обнаружитель: ФРС – формирователь решающей статистики; СУ – селектор сигнала по уровню с порогом u_0 ; СД – селектор сигнала по длительности с порогом τ_0 ; ИУ – индикаторное устройство.

Ложный выброс помехового индикаторного процесса $U_n(t)$, превысивший порог u_0 , проходит контроль по длительности на уровне u_0 и вызывает ложное срабатывание обнаружителя, если его длительность превышает величину τ_0 .

Полагаем, что требуется обеспечить достаточно малую вероятность ложной тревоги ($P_{\text{ЛТ}} < 0.1$) на интервале ожидания сигнала T_0 . При этом условия ложные выбросы, прошедшие контроль по уровню и длительности, являются редкими во времени событиями, подчиняются закону Пуассона [2]. Вероятность $P(0)$ неоявления ни одного такого выброса на интервале T_0 согласно закону Пуассона равна

$$P(0) = e^{-N_\tau},$$

где N_τ – среднее число таких выбросов на интервале T_0 , а вероятность ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}$ определяется выражением

$$P_{\text{ЛТ}} = 1 - e^{-N_\tau},$$

откуда при $N_\tau \leq 0.1$ с достаточной для практики точностью допустимо равенство

$$P_{\text{ЛТ}} \approx N_\tau.$$

Следовательно, требуется определить среднее на интервале T_0 число N_τ выбросов выше порога u_0 , прошедших селекцию по длительности с порогом τ_0 .

Рассматриваем режим ожидания как испытание, в результате которого на интервале T_0 может появиться одно из множества дискретных значений случайной величины – числа ложных выбросов, прошедших двойную селекцию.

При известной вероятности $P(n, \tau_0)$ появления каждого числа в испытании (от $n=0$ до $n=\infty$) их среднее число определяется суммой [3]

$$N_\tau = \sum_{i=1}^{\infty} n \cdot P(n, \tau_0).$$

Вероятность совместного наступления двух случайных событий: появления n выбросов и при этом всех n длительностью $\tau > \tau_0$, определяется по теореме умножения вероятностей

$$P(n, \tau_0) = P(n)P(\tau > \tau_0/n),$$

где $P(n)$ – безусловная вероятность появления n выбросов любой длительности; $P(\tau > \tau_0/n)$ – условная вероятность того, что при появлении n выбросов все они окажутся длительностью $\tau > \tau_0$.

Полагаем, что при малой $P_{\text{ЛТ}}$ на T_0 средний период появления выбросов помехового индикаторного процесса, прошедших двойную селекцию, значительно превышает интервал корреляции процесса. Тогда отсутствует вероятностная связь между мгновенными значениями процесса в моменты выбросов и параметры отдельного выброса, в том числе длительность на уровне u_0 , не зависят от числа выбросов, появившихся до и после него, т.е. от общего их числа на интервале T_0 . Тогда условная вероятность $P(\tau > \tau_0/n)$ становится безусловной

$$P(\tau > \tau_0/n) = P(\tau > \tau_0)$$

и среднее число выбросов, прошедших селекцию по длительности, равно произведению среднего числа выбросов любой длительности N_0 на вероятность того, что выброс выше порога U_0 имеет длительность $\tau > \tau_0$:

$$N_\tau = P(\tau > \tau_0) \sum_{i=1}^{\infty} n \cdot P(n) = P(\tau > \tau_0) \cdot N_0.$$

Соотношение порогов селекции по уровню и длительности в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом

Рассмотрим обнаружитель с нормальным стационарным индикаторным процессом. Среднее число выбросов такого процесса выше порога u_0 на интервале времени T_0 определяется выражением [1]:

$$N_0 = T_0 f_n \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u_0 - m_n}{\sigma_n}\right)^2\right) = T_0 f_n e^{-\frac{k_0^2}{2}},$$

где

$$f_n = \frac{\sqrt{-R_n''(0)}}{2\pi}$$

– средняя квадратичная частота флюктуаций помехового индикаторного процесса; $R_n(\tau)$ – нормированная автокорреляция этого процесса; μ_n, σ_n – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение флюктуаций; u_0 – величина порога.

Известна плотность вероятности длительности выбросов нормального процесса выше относительного порога k_0 [4]:

$$W(\tau, k_0) = \alpha e^{-\alpha\tau}, \quad (1)$$

где

$$\alpha = \frac{f_n}{1 - \Phi(k_0)} e^{-\frac{k_0^2}{2}};$$

$$\Phi(k_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{k_0} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

– интеграл вероятности.

Из (1) получаем:

$$P(\tau > \tau_0) = \int_{\tau_0}^{\infty} \alpha e^{-\alpha\tau} d\tau = e^{-\alpha\tau_0}.$$

Тогда среднее число выбросов выше порога k_0 , превысивших длительность τ_0 , определяется выражением

$$N_\tau = T_0 f_n \exp\left(-\frac{k_0^2}{2} - \alpha\tau_0\right). \quad (2)$$

Из (2) следует, что селекция ложных выбросов по длительности ведет к снижению их среднего числа, и следовательно, к снижению вероятности ложной тревоги.

Не меняя величины $P_{\text{ЛТ}}$ на интервале T_0 , уменьшим относительный порог селекции по уровню, используя селекцию выбросов по длительности. Обозначим уменьшенный относительный порог символом k_τ и определим его величину из условия, что двойной селекцией обеспечивается то же среднее число выбросов (и та же величина $P_{\text{ЛТ}}$ на интервале T_0), которое обеспечивалось только селекцией по уровню с порогом k_0 . Из этого условия получаем равенство

$$\frac{k_0^2}{2} = \frac{k_\tau^2}{2} + \frac{f_n \tau_0}{1 - \Phi(k_\tau)} e^{-\frac{k_\tau^2}{2}},$$

связывающее величины k_0, k_τ, τ_0 .

Нас интересует величина k_τ , когда известны величины порогов k_0 и τ_0 . Для поиска решения трансцендентного уравнения относительно k_τ произведем его преобразование к виду

$$\frac{k_\tau^2}{k_0^2} + 2\varepsilon\varphi(k_\tau) \frac{k_\tau}{k_0} - 1 = 0, \quad (3)$$

где

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2\pi} f_n \tau_0}{k_0},$$

$$\varphi(k_\tau) = \frac{e^{-\frac{k_\tau^2}{2}}}{\sqrt{2\pi} k_\tau (1 - \Phi(k_\tau))}.$$

Структура квадратного уравнения (3)

относительно $\frac{k_\tau}{k_0}$ позволяет искать решение для k_τ

в более удобной форме:

$$\frac{k_\tau}{k_0} = -\varepsilon\varphi(k_\tau) + \sqrt{1 + \varepsilon^2 \varphi^2(k_\tau)}. \quad (4)$$

Учитывая асимптотическое свойство функции $\varphi(k_\tau)$ при $k_\tau \rightarrow \infty$:

$$\lim_{k_\tau \rightarrow \infty} \frac{\exp\left(-\frac{k_\tau^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi} k_\tau (1 - \Phi(k_\tau))} = 1$$

и полагая допустимым приближение

$$\varphi(k_\tau) \approx 1 \text{ при } k_\tau \geq 3$$

из (4) получаем явное соотношение

$$k_\tau = k_0 \left(\sqrt{1 + \varepsilon^2} - \varepsilon \right), \quad (5)$$

где

$$\varepsilon = \sqrt{2\pi} f_n \frac{\tau_0}{k_0}.$$

Таким образом, если относительный порог по уровню k_0 снижается с помощью селекции выбросов по длительности до величины $k_\tau \geq 3$, то для определения k_τ применимо соотношение (5). Если $k_\tau < 3$, то производится решением трансцендентного уравнения (4).

По аналогии с известной связью между относительным порогом по уровню k_τ и его абсолютным значением u_τ

$$u_\tau = \mu_n + k_\tau \sigma_n \quad (6)$$

введем относительный порог по длительности

$$\chi = \sqrt{2\pi} f_n \tau_0$$

и его связь с абсолютным порогом τ_0

$$\tau_0 = \frac{\chi}{\sqrt{2\pi} f_n}. \quad (7)$$

Заключение

Методика определения порогов селекции сигнала по уровню и длительности сводится к следующим действиям:

1. По заданным величинам $P_{\text{ЛТ}}$ и T_0 , а также известному значению частоты f_n помехового индикаторного процесса определяется пороговый коэффициент k_0 без селекции выбросов по длительности [1]:

$$K_0 = \sqrt{2 \ln \frac{f_n T_0}{P_{\text{ЛТ}}}};$$

2. Задается желаемая величина порогового коэффициента k_τ и решается уравнение (4)

относительно неизвестного ε , после чего определяются относительный порог по длительности $\chi = k_0 \varepsilon$.

Для определения вероятностных характеристик обнаружения с селекцией сигнала по уровню и длительности достаточно иметь пороги k_0 и χ .

При аппаратной реализации структуры двухселекторного обнаружителя определяются абсолютные величины порогов u_0 и τ_0 из (6) и (7).

Литература

1. Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Выбор порога селекции сигнала по уровню в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом // Морские Интеллектуальные Технологии. Том 1, №. 4(46), 2019.
2. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1967.
3. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1988.
4. Денисенко А.Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2005.

References

1. Egorov S.B., Gorbachev R.I. Vy`bor poroga selekcii signala po urovnyu v obnaruzhitelyax s normalizovanny`m indikatorny`m processom [Threshold of signal level selector in detectors with normalized indicator process] // Morskie Intellektual`ny`e Tekhnologii, Vol. 1, No. 4(46), 2019
2. Hudson D.J. Lectures on Elementary Statistics and Probability. Geneva: CERN, 1964.
3. Gnedenko B. Kurs teorii veroyatnostej [Probability Theory course]. M.: Nauka, 1988.
4. Denisenko A.N. Signaly`. Teoreticheskaya radiotekhnika. Spravochnoe posobie. [Signals. Theoretical radio engineering. Reference guide]. M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2005.

ИНФОРМАЦИЯ О АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Станислав Борисович Егоров, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: Stanislav.Egorov.1938@gmail.com

Stanislav B. Egorov, Ph.D. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: Stanislav.Egorov.1938@gmail.com

Роман Игоревич Горбачев, аспирант кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: gorbatschow.r@gmail.com

Roman I. Gorbachev, PhD-student (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: gorbatschow.r@gmail.com

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 621.923

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.032

Разработка рациональных рабочих циклов с целью повышения эффективности процесса шлифования

Ю.М. Зубарев¹, В.И. Черненко¹, А.В. Приемышев²¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. Основная задача современного машиностроительного производства состоит в повышении технологического уровня, экономичности, производительности труда и качества выпускаемой продукции. В статье рассматривается возможность решения этих задач при механической обработке заготовок деталей машин за счет повышения эффективности процесса шлифования - одного из наиболее распространенных технологических процессов их механической обработки. Кроме того, показывается возможность автоматизации управления технологическими процессами механической обработки заготовок в машиностроении. Повышение эффективности процесса шлифования, т.е. значительное повышение производительности труда, при сохранении требуемых точности и качества обработки, осуществляется путем применения высоких скоростей резания и управления процессом на основе использования функциональных связей между производительностью труда, расходом абразивного инструмента и технологическими факторами, влияющими на параметры точности и качества обработки заготовок.

Ключевые слова: шлифование, точность, качество, эффективность, скорость резания, циклы обработки, съём металла, силы резания, шлифовальный круг.

Development of rational work cycles in order to increase the efficiency of the grinding process

Urii M. Zubarev¹, Viktor I. Chernenko¹, Alexander V. Priemyshev²¹St. Petersburg State Marine Technical University,²St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great

Abstract. The main task of modern mechanical engineering is to increase the technological level, efficiency, labor productivity and quality of output products. The article discusses the possibility of solving these problems during the mechanical processing of workpieces of machine parts by increasing the efficiency of their grinding process - one of the most common technological processes for their machining. In addition, it shows the possibility of automating the control of technological processes for the machining of workpieces in mechanical engineering. Improving the efficiency of the grinding process, i.e. a significant increase in labor productivity, while maintaining the required accuracy and quality of machining, is carried out by applying high cutting speeds and process management based on the use of functional relationships between labor productivity, consumption of abrasive tools and technological factors that affect the accuracy and quality of workpiece machining.

Keywords: grinding, precision, quality, efficiency, cutting speed, processing cycles, metal removal, cutting forces, grinding wheel.

Введение

Шлифование, как правило, рассматривается как метод чистовой обработки заготовок деталей машин, позволяющий получать 5..7 квалитеты точности и заданное качество обработанной поверхности. Поэтому операции шлифования обычно завершают цикл механической обработки заготовок.

В настоящее время, в связи с совершенствованием заготовительных методов получения заготовок (литье, штамповка, порошковая металлургия, аддитивные технологии и др.), значительно уменьшаются припуски и под их механическую обработку.

Создание и выпуск станкостроительной отрасли промышленности шлифовальных станков, работающих в диапазоне скоростей от 20 до 120 м/с и по автоматическому циклу изменения режимов обработки, позволяет осуществлять управления процессом обработки заготовок по параметрам скорости резания и соединять в одной операция как

черновые - с большим съемом припуска, так и чистовые, а затем и отделочные переходы.

Таким образом, весь технологический процесс механической обработки заготовок возможно осуществлять на одном шлифовальном станке за несколько переходов, тем самым повышая производительность обработки и ее эффективность за счет уменьшения количества металлорежущего оборудования и лезвийного режущего инструмента. Весь процесс обработки заготовок при этом осуществляется за счет автоматизации управления технологическими процессами.

Основой для создания таких операций при обработке закаленных углеродистых, нержавеющей, жаропрочных и быстрорежущих сталей кругами из электрокорунда или эльбора являются полученные ранее результаты и выводы [1,2,3,4], показывающие влияние скорости резания на составляющие силы резания, износ и период стойкости шлифовальных кругов, точность, контактную температуру шлифования и качество обработанной поверхности.

1. Высокоскоростное шлифование

В основе выбора варианта обработки должно лежать главное преимущество высокоскоростного шлифования - повышение производительности процесса, определяемое штучным временем, затраченным на операцию.

Известно, что при сохранении отношения $V_k/V_g=100$, увеличение скорости резания с 17 до 70(80) м/с позволяет увеличить скорость съема металла в 4,2...4,4 раза и при этом получить одно и тоже значение высоты шероховатости поверхности [1].

Существуют варианты разделения обработки на две-три операции (например, черновую, чистовую и тонкую) и выполнения каждой на отдельном станке, настроенном на определенную скорость резания. Однако при этом увеличивается вспомогательное время, а точность получаемых размеров уменьшается по сравнению с первым случаем, когда обработка ведется с одного станка. Для получения оптимального варианта обработки необходимо производить изменение скорости резания, учитывая конкретные условия выполнения операции, рекомендуемые для каждого этапа обработки, технические возможности станка и абразивного инструмента.

Обработку с разными скоростями резания в таких случаях можно осуществлять в одну операцию и производить на одном станке. При этом возможно как ступенчатое изменение скорости резания, так и плавное (если позволяет конструкция станка), что позволяет автоматизировать управление технологическими процессами.

2. Производительность обработки

Производительность обработки зависит от основного времени T_o , необходимого для снятия припуска с заготовки, вспомогательного времени T_b на установку и снятие заготовки, её измерение, управление станком и времени обслуживания $T_{обсл}$. Основную часть времени обслуживания занимает процесс периодической правки круга. Результаты проведенных исследований показывают, что с увеличением скорости резания появляется возможность увеличить интенсивность съема металла при сохранении периода стойкости электрокорундового круга постоянным. Поэтому можно считать, что время, затрачиваемое на правку круга, не изменяется, и для определения изменения штучного времени можно учитывать только изменение основного времени, считая вспомогательное время и время обслуживания постоянным при изменении скорости резания.

Основное время при шлифовании можно определить как выражения [6]

$$T_o = Q/Q_{ном}; \quad (1)$$

где Q - объем металла, подлежащего съему, мм;
 $Q_{ном}$ - действительный съем металла, мм.

Для плоской заготовки

$$Q = b \times l \times z; \quad (2)$$

где l и b - длина и ширина обрабатываемой поверхности заготовки, мм;

z - припуск на обработку, мм.

$$Q_{ном} = Q_{уд} \times V/K_c; \quad (3)$$

где V - высота круга, в мм;

K_c - коэффициент съема металла, зависящий от жесткости технологической системы, радиальной составляющей силы резания и износа круга, характеристики круга и обрабатываемого металла [6];

$Q_{уд}$ - скорость съема металла на единицу высоты шлифовального круга, мм³/(мм×мин);

$$Q_{уд} = 9,2 \times 10^4 (a_z^2)_{cp} \times N_p \times V_k \times (1 - E_b) \times \sqrt{D \times \rho}; \quad (4)$$

a_z - среднее значение толщины среза единичным абразивным зерном в круге, мм [1,2];

N_p - количество активных режущих кромок на единицы рабочей поверхности шлифовального круга, проходящих в зону шлифование за 1 мин., мм²;

V_k - скорость шлифовального круга, м/с;

D - диаметр шлифовального круга, мм;

ρ - средний радиус округления вершин режущих кромок абразивных зёрен, мкм [1, 6];

E_b - коэффициент выдавливания, зависящий от скорости резания и пластических свойств материала [6]. Для большинства закалённых сталей $E \approx 1,0$.

Тогда подставляя (2), (3), и(4) в формулу (1) получим выражение для T_o :

$$T_o = \frac{bl \approx k_c}{9,2 \times 10^{-4} a_{zcp}^2 N_p V_k (1 - E_b) V \sqrt{D \rho}}; \quad (5)$$

В полученной зависимости можно выделить влияние скорости резания на производительность в виде трёх основных эффектов: кинематического (V_k), скоростного (a_{zcp}) и статического (N_p) [1].

Изменение скорости резания приводит к пропорциональному изменению числа режущих кромок, проходящих зону шлифования в единицу времени (кинематический эффект), к изменению силы, действующей на каждую режущую кромку при одном сечении среза, выдерживаемого вершиной абразивного зерна (скоростной эффект), к изменению критического отношения a_z/ρ , характеризующего момент начала резания (статический эффект). По формуле (5) можно рассчитать основное время всего цикла и отдельного этапа. Как видно из зависимости, увеличение скорости резания приводит к пропорциональному уменьшению основного времени обработки.

Для получения оптимального варианта обработки необходимо определить влияние скорости резания на факторы, ограничивающие повышение производительности: качество шлифованных поверхностей, точность размеров и геометрической формы заготовок.

Достижение заданной точности обработки имеет особенно важное значение при чистовых операциях шлифования. Для определения влияния скорости резания на точность размеров и геометрическую форму заготовок исследовалось изменение отношений одноимённых погрешностей заготовок до (Δ'_3) и после обработки (Δ_3), т.е. уточнение $\epsilon = \Delta'_3/\Delta_3$.

Фактическая точность размеров и геометрической формы обработанных заготовок в сильной степени зависит от изменения величины отжатий в упругой технологической системе вследствие колебаний нормальной составляющей силы резания P_y . Величину Δ'_3 можно определить, подставив в формулу для ϵ выражение P_y в зависимости от скорости резания и других режимов:

$$\Delta'_3 = \frac{kV_k^2 V_d^y (t_{max}^z - t_{min}^z)}{C}, \quad (6)$$

где C - коэффициент жесткости шпинделя относительно стола станка.

Погрешность исходной заготовки $\Delta_3 = t_{max} - t_{min}$.

На рис.1 показано влияние скорости резания на уточнение ϵ , рассчитанное по формуле (6) и полученное экспериментально при шлифовании закаленной стали 45 за один рабочий ход кругом 24AF60KV ГОСТ Р 52781-2007. Режимы обработки: $V_k=17, 35, 70$ м/с; $V_d=20$ м/мин; $\Delta_3=0,03$ мм; $t_{min}=0,01$ мм; $t_{max}=0,04$ мм; СОТЖ - 5% -ный водный раствор эмульсола, подаваемый в зону шлифования под давлением 4×10^5 Па.

Анализ показывает, что при постоянной скорости съема значение уточнения обратно пропорционально нормальной составляющей силы резания. Следовательно, можно подобрать такое значение вертикальной подачи (глубины резания), когда будет обеспечено равенство значений Δ_{Py} и Δ'_3 . Например, при $V_k=35$ м/с, $t=0,01$ мм и при заданном значении $\Delta_3=0,03$ мм имеем $\Delta_{Py}=67,3$ Н и $\Delta'_3=0,054$ мм. Примерно такие же значение для Δ_{Py} и Δ'_3 можно получить при $V_k=70$ м/с и $t=0,04$ мм, т.е. при увеличении скорости съема металла почти в 4 раза. Ограничениями для увеличения скорости съема металла в данном случае является шероховатость поверхности и качество металла поверхностного слоя.

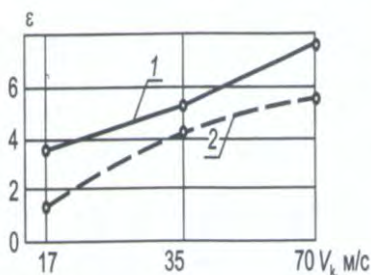


Рис. 1 Влияние скорости резания на величину уточнения при шлифовании закаленной стали 45 1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные

В случае необходимости сохранения постоянства параметров качества поверхности при $V_k=70$ м/с следует увеличить скорость изделия до соотношения $\frac{V_k}{V_d} = 100$ при легких режимах ($t = 0,01$ мм) шлифования после трех ходов погрешность заготовки, переносимая с предыдущих переходов, становится равной погрешности обработки на данном станке, а при более интенсивных режимах шлифования ($t > 0,01 \dots 0,02$ мм) для этого необходимо провести 4 - 5 ходов "выхаживания" без подачи круга на глубину.

Определённое экспериментально для разных скоростей резания минимальное значение отклонения от плоскости и прямолинейности при обработке закаленной стали 45 кругом 24AF60V равно 0,004 мм, что соответствует четвертой степени точности при толщине заготовки 25 мм (рис.2). При этом точность полученных размеров для заготовок, имеющих толщину свыше 6 мм, находится в пределах 5-го качества точности и не зависит от скорости резания.

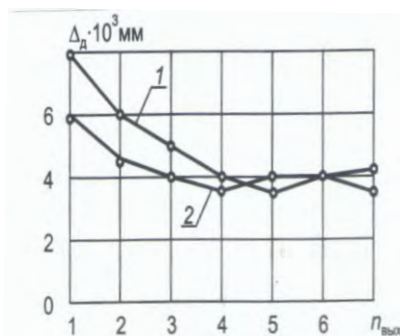


Рис. 2. Влияние на отклонение от плоскостности и прямолинейности числа ходов «выхаживания» при обработке закаленной стали 45: 1 – 35 м/с; 2 – 70 м/с

С точки зрения достижения наивысшей и стабильной точности изготовления деталей, обработка с поверхностной скоростью резания выгоднее, так как процесс в этом случае характеризуется снятием более тонкой стружки (с увеличением скорости резания значения отношения a_z/p уменьшаются) и влияние причин, вызывающих рассеяние размеров и появление погрешности геометрической формы заготовок, уменьшается [3].

Однако, при больших скоростях вращения шлифовального круга и перемещениях стола с заготовкой, на точности обработки сказываются вибрации, возникающие в связи с неравномерностью износа круга. При этом преимущества увеличения скорости резания почти не реализуются. Уменьшение скорости стола с изделием может отрицательно сказаться на тепловом балансе обработки и качестве шлифуемой поверхности. Поэтому для снятия основной части припуска необходимо работать при наибольшей рекомендуемой скорости резания, а затем, для достижения заданной точности размеров и качества обработанной поверхности, необходимо переходить на более низкие скорости. В этом случае образующиеся при неравномерном износе волны на поверхности круга сглаживаются [4].

Необходимость уменьшения скорости резания на этапе «выхаживания» диктуется еще и тем, что при шлифовании с большими скоростями не рекомендуется допускать затупление круга до образования площадок износа с диаметром 40...60 мкм, так как при таком износе составляющая сила резания и силы трения возрастают пропорционально площади износа. При этом увеличивается величина погрешности обработки вследствие упругих отжаты системы шлифовальный круг - стол станка [5].

Таким образом, увеличение скорости резания на операции плоского шлифования позволяет уменьшить число ходов при снятии основного припуска и тем самым значительно сократить основное время обработки, не ухудшая качество поверхности и не снижая точности получаемых размеров.

Выбор варианта построения рациональной структура операции плоского шлифования с использованием высоких скоростей резания зависит от того, какая из двух задач решается:

- увеличение скорости съема металла примерно пропорционально увеличению скорости резания при достижении высоких требований к

точности получаемых размеров и качеству обработанных поверхностей;

- резкое увеличение скорости съёма металла с нежесткими требованиями к точности получаемых размеров и качеству поверхности;

3. Разработка рабочих циклов шлифования

Плоскошлифовальный станок с крестовым прямоугольным суппортом и горизонтальным шпинделем модели ЗЕ711ИВ, оснащённый тиристорным приводом вращения круга конструкции ВСКБЗШ и ЗС, модернизированный на расширенный диапазон изменения скоростей резания (17...70 м/с), для которого разрабатывались варианты обработки, позволяет осуществить решение этих задач в автоматическом цикле.

Последовательность автоматического цикла следующая. После установки заготовки на станке производится шлифование на черновых режимах. Далее происходит автоматическое переключение на тестовой режим, уменьшаются вертикальные и поперечные подачи и скорости продольного перемещения стола. По достижении заданного размера отключается вертикальная подача и начинается «выхаживание», число которого предварительно настраивается. После окончания «выхаживания» происходит отскок шлифовальной головки на заранее настроенную величину, остановка стола в крайнем правом положении, а суппорта - в переднем. Цикл окончен. В автоматический цикл обработки включена автоматическая правка шлифовального круга после определённого, настраиваемого заранее, числа циклов. С механизмом правки кинематически связано устройство регулирования скорости круга. При уменьшении диаметра круга подаётся электрическая команда на увеличение частоты вращения шпинделя. Автоматизация цикла осуществляется путем измерения текущего размера заготовки с помощью прибора активного контроля БВ-4138 и подача соответствующих команд для изменения скорости и подачи. На рис.3 и в табл.1 показан вариант обработки для решения первой задачи.

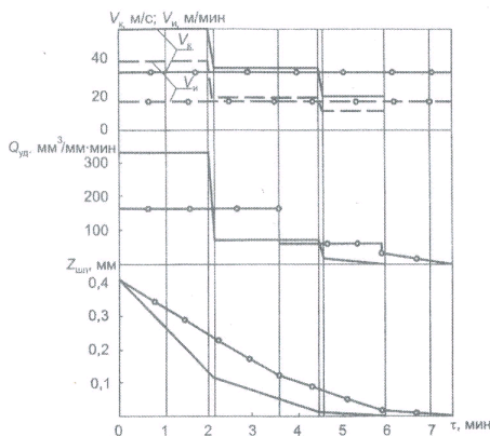


Рис. 3. Рабочий цикл на операциях плоского шлифования заготовки из стали 45 (HRC 44...48) кругом 24AF60KV с постоянной скоростью резания (—) и с переменной(-)

Таблица 1

Режимы обработки и технологические параметры рабочих циклов плоского шлифования заготовки из стали 45 (HRC 44...48) кругом 24AF60V

Режимы и технологические параметры	Черновое		Чистовое		«Выхаживание»	
	V, по-стоянная	V, пере-менная	V, по-стоянная	V, пере-менная	V, по-стоянная	V, пере-менная
V _н , м/с	35	60	35	35	35	20
V _д , м/мин	20	40	20	20	20	12
V _н /V _д	100	90	100	100	100	100
S _п , мм/ход	4	4	4	4	4	4
l, мм	0,03	0,04	0,02	0,02	—	—
Номинальный припуск z _н , мм	0,3	0,3	0,1	0,1	0,02	0,015
Q _н , мм³	12 000	13 200	4000	4000	960	650
Q _ч , мм³	11 160	12 672	3880	3880	960	650
Q _в , мм³/(мм·мин)	160	320	80	80	48	22
Время обработки, мин	3,5	2,0	2,4	2,4	1,5	1,5
Время переходного периода, мин	—	0,1	—	0,1	—	—
Число ходов «выхаживания»	—	—	—	—	3	2
Глубина дефектного слоя, мм	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01
R _а , мкм	1,2	1,4	0,9	0,9	0,5	0,5
Основное время на операцию	—	—	—	—	7,4	0,1
Отклонение от плоскостности и прямолинейности, мм	—	—	—	—	0,005	0,005

Исходные данные:

1) заготовка - "крышка" 400×100×40, материал – сталь 45 (HRC 44...48);

2) шлифовальный круг 250×76×20 24AF60KV, ГОСТ P52781-2007;

3) припуск под шлифование z = 0,5 мм;

4) требования к точности обработки и качеству шлифовальных поверхностей: точность размеров – размер 40 h6 по IT6; точность формы – допуск плоскостности и прямолинейности обработанной поверхности не должен превышать 0,008 мм на всей длине; качество поверхности – шероховатость поверхности R_а = 0,4 мкм, упрочнение на глубину не более 0,01 мм.

При разработке цикла шлифования учитывались следующие особенности обработки на станке указанной модели:

- наименьшее поперечное перемещение стола - 200мм;

- автоматическое изменение скорости продольного перемещения стола с большей на малую при переходе с черновых режимов на чистовые. При этом на чистовых режимах уменьшается длина хода стола, которая устанавливалась с таким расчетом, чтобы при чистовых режимах щуп прибора активного контроля опускался на поверхность заготовки, а шлифовальный круг сходил с неё в момент реверса стола;

- время переходного периода при переключении скоростей круга и стола с заготовкой определялось с помощью секундомера до момента стабилизации частоты вращения шпинделя, замеренной тахометром. При этом необходима синхронизация переключения скоростей, в задачу которой входит исключение возможного увеличения в переходный период значений толщины среза абразивным зерном и уменьшение мгновенных значений отношения V_к/V_д. Если этой синхронизации не производить, то в переходный период могут возникнуть кратковременные тепловые и динамические перегрузки, что может вызвать повышенный износ круга и прижоги на обработанной поверхности.

Таким образом, на операции плоского шлифования переключение скоростей целесообразно выполнять в момент выхода шлифовального круга из контакта с поверхностью заготовки, т.е. в момент реверса поперечной подачи.

Экспериментальная проверка данного цикла путем шлифования партии деталей показала, что время цикла уменьшается примерно на 18%. Следует отметить, что период стойкости шлифовального круга при обработке по обоим вариантам оказалось примерно одинаковым. Приведенный на рис.3 цикл со ступенчатым регулированием скорости вращения круга, скорости стола с изделием и изменением вертикальной подачи был реализован при постоянной поперечной подаче $s = 4$ мм/ход. Увеличение последней приводит к увеличению скорости съема металла, однако при этом ухудшается качество шлифовальной поверхности и увеличивается теплонапряженность в зоне обработки. Уменьшение поперечной подачи может в значительной мере увеличить основное время обработки, но уменьшить шероховатость и увеличить точность геометрической формы заготовки путем увеличения числа повторных ходов круга или числа ходов «выхаживания» при снятии основного припуска (на этапах черновой и чистовой обработки).

Вариант с бесступенчатым изменением скорости резания на операции шлифования той же заготовки тем же кругом показан на рис.4.

Применение такого цикла позволило уменьшить основное время в 1,85 раза по сравнению с обработкой при постоянной скорости резания, равной 35 м/с, путем исключения «выхаживания». При этом параметры качества обработанной поверхности и точности геометрической формы оказались практически одинаковыми в обоих случаях ($R_a = 0,5$ мкм, величина отклонений от плоскостности и прямолинейности не более 0,007 мм). Изменение скорости резания и скорости продольного перемещения стола производилась после каждого перехода. Значение скоростей предварительно рассчитывали с учётом числа ходов, необходимых для снятия заданного припуска при выбранном значении вертикальной подачи шлифовального круга таким образом, что сохранялось отношение $V_k/V_d = 100$.

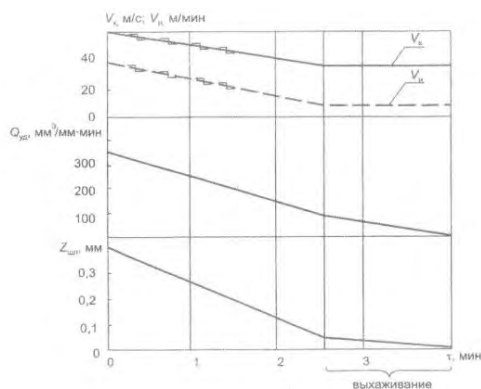


Рис. 4. Рабочий цикл на операциях плоского шлифования заготовки из стали 45(HRC 44...48) кругом 24AF60KV с бесступенчатым изменением скорости резания

Изменение вращения круга и направления продольного перемещения стола производится при полном выходе круга из зоны обработки в момент реверса поперечной подачи. В этом случае нейтрализуются возможные отрицательные взаимодействия переходного периода на качество шлифованных поверхностей и износ круга. Следует отметить, что данные варианты циклов являются наиболее эффективными только для конкретных условий обработки (характеристика шлифовального круга, состав и способ подачи СОТЖ, режимы правки и др.). В случае изменения этих условий (на пример, для получения жестких требований к качеству обработанных поверхностей, рекомендуем уменьшить твердость круга на одну степень и увеличить давление СОТЖ и т.п.) можно найти более эффективный вариант цикла шлифования, разработанный по такому же принципу.

На рис. 5 показан цикл для решения второй задачи. Он характерен тем, что состоит из двух этапов обработки. Первый – черновой, производится при предельном увеличении скорости съема металла. Ограничениями в этом случае является период стойкости шлифовального круга и качество металла поверхностного слоя (прижоги с распространением сильно отпущенного слоя на большую глубину, для удаления которого потребуются специальные методы или значительные затраты времени при чистовой обработке).

Второй этап состоит в 2...3 ходах «выхаживания» при $V_k = 35$ м/с, с уменьшением поперечной подачи для частичного улучшения качества металла поверхностного слоя заготовки. Увеличения скорости резания до 60 м/с, по сравнению с обычными скоростями, позволяет пропорционально увеличивать скорость съема металла при постоянном периоде стойкости круга, однако при этом повышается контактная температура шлифования. Для частичной нейтрализации данного явления необходимо использовать в качестве абразивного материала циркониевый электрокорунд 38А, более стойкий к истиранию, чем белый электрокорунд, а твердость круга увеличить на одну-три степени, оставляя зернистость без изменения. При этом следует обязательно применять специальные составы СОТЖ и способы подачи её в зону шлифования. Такие циклы рекомендуются при разделении операций и выполнении каждой на отдельном станке или при замене других операций (например, фрезерования) операциями обдирочного шлифования для получения более низкой высоты шероховатости поверхности.

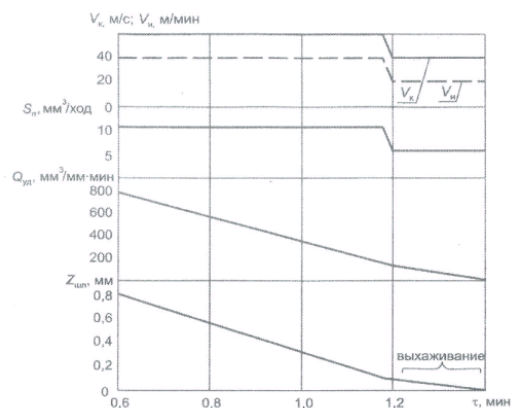


Рис. 5. Рабочий цикл на операциях плоского обдирочного шлифования заготовки из стали 45 с изменением скорости резания, скорости стола с изделием и поперечной подачи

Заключение

1. Применение комбинированных рабочих циклов при шлифовании с использованием рациональных скоростей резания позволяет значительно увеличить производительность обработки заготовок деталей машин.
2. Автоматизация управления технологическими процессами позволяет повысить точность и качество обработки.
3. Внедрение высокоскоростного шлифования и автоматизации процесса управления технологическим процессом позволяет сократить необходимое количество металлорежущего и потребность в дорогостоящем твердосплавном инструменте.

Литература

1. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Технологические основы высокопроизводительного шлифования сталей и сплавов. – СПб.: Изд-во С-Петербургского университета, 1994. - 220с.
2. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Устойчивость процесса шлифования с учетом его динамических характеристик. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. - 388с.
3. Зубарев Ю.М. Математические основы управления качеством и надежностью изделий. – СПб: Изд-во «Лань», 2017. - 176с.
4. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении.- СПб.: Политехника, 2007. - 424с.
5. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. - 320с.
6. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. - М.: Инновационное машиностроение, 2019. - 800с.

References

1. Zubarev YU.M., Priemyshev A.V. Tekhnologicheskie osnovy vysokoproizvoditel'nogo shlifovaniya stalej i splavov [Technological bases of high-performance grinding of steels and alloys]. SPb.. Izdvo S Peterburgskogo universiteta, 1994. 220s.
2. Zubarev YU.M., Priemyshev A.V. Ustojchivost' processa shlifovaniya s uchetom ego dinamicheskikh harakteristik [Stability of the grinding process taking into account its dynamic characteristics]. SPb.. Izdvo Politekhnicheskogo universiteta, 2016. 388s.
3. Zubarev YU.M. Matematicheskie osnovy upravleniya kachestvom i nadezhnost'yu izdelij [Mathematical foundations of product quality and reliability management]. – SPb. Izdvo Lan', 2017. 176s.
4. Kremen' Z.I., YUr'ev V.G., Baboshkin A.F. Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii [Technology of grinding in mechanical engineering]. SPb.: Politehnika, 2007. 424s.
5. Makarov V.F. Sovremennye metody vysokoeffektivnoj abrazivnoj obrabotki zharoprochnyh stalej i splavov [Modern methods of high-performance abrasive treatment of heat-resistant steels and alloys]. SPb.: Izdvo Lan', 2013. 320s.
6. Spravochnik tekhnologa pod obshch. red. A.G. Suslova [Reference book of the technologist. under the General editorship of A. G. Suslov]. M. Innovacionnoe mashinostroenie, 2019. 800s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT AUTHORS

Юрий Михайлович Зубарев, доктор технических наук, профессор кафедры технологии судового машиностроения Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: iuzubarev@mail.ru

Urii M. Zubarev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of marine engineering technology Department, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: iuzubarev@mail.ru

Виктор Игоревич Черненко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, технологии судового машиностроения, Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3, e-mail: vichernenko@yandex.ru

Viktor I. Chernenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, head of the Department, marine engineering technologies State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: vichernenko@yandex.ru

Александр Владимирович Приемышев, кандидат технических наук, профессор кафедры Автоматы, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: priemyshev52@mail.ru

Alexander V. Priemyshev, Ph.D. (Eng), Professor of the Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnic str., 29, St. Petersburg 195251, Russian Federation, e-mail: priemyshev52@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 504.064.4

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.033

Методические подходы к созданию экотехнопарка на примере Санкт-ПетербургаА.Г.К. Герко¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассмотрена проблематика в области обращения с отходами в Санкт-Петербурге. Рассматриваются положения стратегических документов в области охраны окружающей среды Российской Федерации на федеральном и региональном уровнях, в частности г. Санкт-Петербурга для выявления актуальных целевых показателей, достижению которых могут способствовать комплексы по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов. Выявлена схожесть целей и задач, установленных в стратегических документах федерального и регионального уровней. В качестве решения полигонного захоронения отходов в Санкт-Петербурге предлагается развитие сети экотехнопарков. В работе предлагается методология создания экотехнопарка, а также модель экотехнопарка: перечень основных объектов и возможные потребители получаемой продукции. В статье раскрывается понятие экотехнопарка, его основная цель и решаемые задачи для региона.

Ключевые слова: обращение с отходами, твердые коммунальные отходы, экотехнопарк, целевые показатели, объектный состав, обезвреживание, обработка, методические подходы.

Methodological approaches to arrangement of an ecological and technological cluster at the example of St. PetersburgA.G.K. Gerko¹¹St. Petersburg State Marine Technical University

Abstract. The article reviews the problems in the field of waste management in St. Petersburg. The article reviews the provisions of strategic documents in the field of environmental protection of the Russian Federation at the federal and regional levels, in particular, St. Petersburg in order to identify relevant targets, the achievement of which can be facilitated by waste treatment, disposal and deactivation complexes. The similarity of goals and objectives established in strategic documents of the federal and regional levels has been revealed. As a solution to the landfill in St. Petersburg, the development of a network of ecological and technological clusters has been proposed. The paper proposes a methodology for arranging an ecological and technological cluster, as well as a model of an ecological and technological cluster: a list of the main facilities and possible consumers of the resulted products. The article reveals the concept of an ecological and technological cluster, its main goal and the tasks to be solved for the region.

Keywords: waste management, municipal solid waste, ecological and technological cluster, targets, facility-level content, disposal, treatment, methodological approaches.

Введение

Одной из главных экологических проблем в РФ, и в частности в Санкт-Петербурге, является проблема обращения с отходами. В 2018 году на территории Российской Федерации образовалось 7,266 млн. т отходов, что на 16,8 % выше уровня 2017 г. За последние 8 лет количество ежегодно образующихся отходов увеличилось в 2 раза с соответствующим ростом объемов захоронения отходов производства и потребления. Так, за 2010-2018 год показатели захоронения ТКО увеличились с 593,0 млн. т до 1 029,2 млн. т.

В связи с этим в настоящее время назрела необходимость в обосновании новых подходов и разработке организационных и технико-технологических решений в области обращения с ТКО, одним из которых и могут стать экотехнопарки.

1. Текущее состояние в области обращения отходами в Санкт-Петербурге

В соответствии с докладом об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2018 году с территорий административных районов Санкт-Петербурга было вывезено 1,86 млн. т твердых коммунальных отходов (далее – ТКО) (I-V класса

опасности) [1]. И эта цифра ежегодно растет. Согласно данным Росстата из указанного выше количества отходов: на обработку и обезвреживание направлено 20,9 %, на захоронение – 79,1 %. Кроме этого, на территории Санкт-Петербурга в 2018 году выявлено 515 свалок ТКО общей площадью 55,6 га, ликвидировано только 473 шт. площадью 46,3 га. Лишь некоторая часть ТКО, образуемых в Санкт-Петербурге, перерабатывается на двух площадках мусороперерабатывающего завода (далее – МПЗ), основная же часть ТКО размещается на полигонах по захоронению ТКО без переработки.

МПЗ выполняют задачу только частичного обезвреживания ТКО, и практически не сокращают массу ТКО, направляемых на захоронение.

Производительность завода ГУП «Завод МПБО-2» позволяет перерабатывать 267 тыс. тонн в год ТКО, и не удовлетворяет растущим потребностям Санкт-Петербурга.

Полигон ПТО «Новоселки» являлся одним из крупных в Санкт-Петербурге и принимал большую часть ТКО, но в настоящее время исчерпал свои ресурсы и закрыт на рекультивацию.

Полигон, который в настоящее время принимает ТКО Санкт-Петербурга – ООО «Новый Свет-Эко» общей площадью 43,15 га с зоной складирования

35,7 га расположен в Гатчинском районе Ленинградской области в пяти км к северу от пос. Новый Свет. Проектная мощность (вместимость) полигона – 18 млн т., годовая мощность – 900 тыс. т. Полигон ООО «Новый Свет-Эко» эксплуатируется с 2001 года. При эксплуатации на полную мощность окончание работы полигона намечается в 2021 году.

Дополнительные мощности по захоронению ТКО Санкт-Петербурга представлены организациями: ООО «Полигон ТБО», ЗАО «Промотходы», ООО «Спецавтотранс», ООО «Профспецтранс», ООО «Экоплант» [2].

На сегодняшний день в г. Санкт-Петербурге количество образующих ТКО ежегодно растет, как и огромные площади земельных участков, занимаемые под их размещение, подверженные деградации. В связи с чем, остро стоит вопрос обращения с отходами.

2. Стратегические цели и задачи в области обращения с отходами

2.1 Федеральный уровень

Одной из приоритетных задач Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года является эффективное использование природных ресурсов, повышение уровня утилизации отходов производства и потребления [3].

Согласно "Стратегии", ежегодно образуется примерно 4 млрд. тонн отходов производства и потребления, из которых 55-60 млн. т составляют ТКО. Увеличивается количество отходов, которые не вовлекаются во вторичный хозяйственный оборот, а размещаются на полигонах и свалках, что приводит к выводу из оборота продуктивных сельскохозяйственных угодий. Около 15 тысяч санкционированных объектов размещения отходов занимают территорию общей площадью до 4 млн. га, и эта территория ежегодно увеличивается еще на 300-400 тыс. га [3]. В связи с этим стала насущной необходимость обращения к законодательству РФ для определения курса развития страны в данном направлении.

На основе анализа динамики обработанных, утилизированных, обезвреженных ТКО в общем объеме их образования были определены целевые показатели на период до 2030 г. (Таблицы 1 и 2).

2.2 Региональный уровень

В соответствии с действующим Экологическим кодексом Санкт-Петербурга, утвержденным Законом Санкт-Петербурга от 18.07.2016 N 455-88, Правительство Санкт-Петербурга осуществляет полномочия в области обращения с отходами. В том числе, участвует в разработке и выполнении федеральных и региональных программ в области обращения с отходами производства и потребления.

Одна из них – государственная программа Санкт-Петербурга «Благоустройство и охрана окружающей среды в Санкт-Петербурге», утвержденная Постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 17.06.2014 № 487 направлена на повышение комфортности условий проживания граждан, обеспечение экологического благополучия, улучшение санитарного и эстетического состояния территорий Санкт-Петербурга. В том числе, на «Повышение эффективности управления в области обращения с отходами производства и потребления, санитарной очистки территории Санкт-Петербурга» (Подпрограмма 3). При этом, основополагающими приоритетами политики Правительства СПб в сфере обращения ТКО являются: максимальное снижение уровня экологической опасности, вредного воздействия образуемых ТКО для здоровья жителей Санкт-Петербурга; максимальное (рациональное) использование природных ресурсов; обработка ТКО; утилизация ТКО; обезвреживание ТКО.

Учитывая сложившиеся обстоятельства, решение обеспечения выполнения данных приоритетов может быть достигнуто только путем построения комплексной системы управления отходами и вторичными ресурсами [7].

То есть, необходимо обеспечить применение экономических, технологических, правовых средств регулирования, поиск новых и внедрение существующих технологий по уменьшению образования ТКО, а также технологий по их переработке в целях получения вторичных материальных и энергетических ресурсов [7].

Таким образом, для того чтобы изменить ситуацию нужны принципиально новые решения. И таким решением может соответствовать в необходимой и достаточной степени экотехнопарк.

3. Понятие экотехнопарка

Стратегией развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 25 января 2018 г. № 84-р впервые в Российской Федерации введено понятие Экотехнопарка (далее – ЭТП).

ЭТП – комплекс объектов с энергетическими и материально-сырьевыми взаимозависимыми балансами, и связями, включающий в себя здания и сооружения, технологическое и лабораторное оборудование, выполняющий прием и непрерывную переработку отходов, производство на их основе промышленной продукции, и осуществление научной, и/или образовательной деятельности [6]. ЭТП своего рода симбиоз промышленных процессов предприятий различных отраслей промышленности, функционирующий посредством физического обмена материалами, энергией, водой и вторичными материальными ресурсами [8,9].

Таблица 1

Целевые показатели, представленные в нормативных документах федерального уровня

Наименование документа	Государственная программа РФ «Охрана окружающей среды» на 2012-2020 годы [4] / Паспорт [5] национального проекта «Экология»		Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года (Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 г. № 84-р) [6]		
	Целевой показатель	Доля ТКО, направленных на утилизацию, в общем объеме образованных твердых коммунальных отходов, %	Доля ТКО, направленных на обработку в общем объеме образованных твердых коммунальных отходов, %	Доля утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образованных отходов, %	Доля ТКО, направленных на обработку, в общем объеме отходов, вывезенных с мест накопления, %
2019	7	12	63,3	12,0	7
2020	16,2	27	65,0	15,0	12
2021	22,8	38	-	-	-
2022	24	40	-	-	-
2023	33	55	-	-	-
2024	36	60	-	-	-
2025	-	-	75,0	50,0	30
2030	-	-	86,0	80,0	70

Таблица 2

Целевые показатели, представленные в нормативных документах Санкт-Петербурга

Наименование документа	Государственная программа Санкт-Петербурга «Благоустройство и охрана окружающей среды в Санкт-Петербурге»	Закон Санкт-Петербурга от 19 декабря 2018 г. N 771-164 «О Стратегии социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 года»
Целевой показатель	Увеличение количества обработанных, утилизированных, обезвреженных ТКО в общем объеме образовавшихся отходов (к уровню 2016 года), %	Доля обработанных, утилизированных, обезвреженных ТКО в общем объеме образовавшихся ТКО, %
2019	2,9	-
2020	21,3	-
2021	21,3	38,4
2022	21,3	-
2023	31,6	-
2024	-	48,7
2025	-	-
2030	-	100,0

Он может располагаться, как на территории одного субъекта РФ, так и на территории нескольких субъектов РФ. Классификация ЭТП различна и зависит от морфологии поступающих отходов, например, аграрный ЭТП направлен на переработку сельскохозяйственных отходов, комбинированный ЭТП – на переработку отходов производства и потребления.

4. Методология создания экотехнопарка

В настоящее время отсутствуют какие-либо методические материалы и подходы по созданию экотехнопарка. В связи с этим в данной работе предлагается к рассмотрению следующий алгоритм создания экотехнопарка.

Этап 1. Анализ системы обращения с отходами территории, на основе которого определяются:

- основные зоны концентрации образования отходов;
 - объемы образования ТКО на текущее состояние и перспективу;
 - морфологический состав ТКО;
 - логистика потоков отходов и мест их размещения;
 - заполненность полигонов;
 - наличие, месторасположение и уровень готовности объектов по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов (возможные резиденты экотехнопарка);
 - приоритетные типы промышленных отходов и источники их образования для последующего вовлечения в работу экотехнопарка.
- Этап 2. Оценка состояния регионального рынка вторичных ресурсов:

– определяются потенциальные потребители вторичных ресурсов и продукции из них.

Этапе 3. Определяется место расположения экотехнопарка с глубокой проработкой местных условий с учетом экологических, санитарных и градостроительных требований.

Этап 4. На основе полученного массива информации, определяются объектный состав экотехнопарка, перечень технологических решений и предложения по поставщикам оборудования.

Этап 5 (последний). Разработка концепции создания и развития экотехнопарка.

5. Модель экотехнопарка в Санкт-Петербурге

Варианты функционирования и работы экотехнопарка могут быть различны в зависимости от принимаемых проектных решений. Для Санкт-Петербурга с учетом условий и типичного для региона морфологического состава отходов предлагается экотехнопарк комбинированного типа с переработкой ТКО и промышленных отходов.

Объектный состав экотехнопарка:

1. Объект по переработке отходов.
2. Объект по обезвреживанию отходов.

Продукция: тепло и электроэнергия.

3. Объект обработки отходов с извлечением возможных полезных фракций. Продукция: черные и цветные металлы, макулатура, пластик, элементы питания.

4. Объект компостирования отходов. Продукт: техногрунт.

5. Объект по производству инертных и строительных материалов из золошлаковых отходов. Продукция: цементные блоки.

Поступающие ТКО выгружаются на объекте предварительной переработки ТКО и подаются на сортировку грохочением.

Надрешетный продукт поступает на объект для обработки отходов с извлечением возможных полезных фракций, а подрешетный – на компостирование. При этом сокращается объем отходов с получением вторичных материальных ресурсов (далее – ВМР). В результате обезвреживания отходов с учетом передовых технологий, вырабатывается тепловая и электрическая энергия. Извлеченные полезные и опасные фракции реализуются потребителям, заинтересованным в получении ВМР. Полученный при компостировании компост смешивается с чистым грунтом получения условно плодородных почв (техногрунтов).

Образующиеся в результате сжигания отходы направляются на объект по переработке и производству инертных и строительных материалов.

Основная цель создания ЭТП в Санкт-Петербурге – снижение объемов полигонного захоронения отходов, извлечение и вовлечение в хозяйственный оборот вторичных материальных ресурсов. При этом ожидается:

- снижение нагрузки на окружающую среду, в первую очередь Санкт-Петербурга;
- создание инновационных производств по обезвреживанию и утилизации отходов;
- снижение уровня потребности в выделении новых земельных территорий для новых полигонов;
- повышение уровня использования вторичного сырья;

– развитие научного потенциала, создание прикладных работ, опытных производств и развития отечественных технологий утилизации отходов;

– создание и развитие отрасли по переработки отходов;

– создание новых высококвалифицированных рабочих мест.

Реальные предпосылки для создания в регионе экотехнопарка данного типа назрели. Так, уже сегодня полигон "Новый Свет-Эко" имеет высокий уровень готовности перехода в новый статус, стабильный морфологический состав поступающих отходов.

Технологические процессы основаны на максимальном использовании ресурсного потенциала отходов. Поступившие отходы, пройдя систему взвешивания и радиационного контроля, поступают на площадку разгрузки. С площадки отходы посредством погрузчика подаются в измельчитель, обеспечивающий функции разрывания мусорных пакетов, измельчения до необходимых размеров оптимальных для сортировки, далее из отходов посредством магнитной сепарации извлекается лом черного металлолома. Производится сбор древесины [11].

На полигоне внедрена эффективная технология сортировки отходов с ручной выборкой утилизируемых компонентов: алюминевая банка, полиэтиленовая пленка, макулатура, стеклобой, ПЭТ-бутылки, пластмасса. ВМР брикетируются и/или складируются для отправки потребителю. На территории полигона существуют 26 скважин для мониторинга грунтовых вод. Отслеживаются основные параметры и процессы, происходящие с отходами со временем: минерализация, выделение свалочных газов, уплотнение и пр. (Рис. 1-3).

Значительно снизить потенциальный вред на окружающую среду стало возможно, за счет применения первой в России технологии дегазации полигона с электростанцией, работающей на свалочном газе. Данная мобильная электростанция на базе двух энергетических генераторных установок Caterpillar с суммарной установленной мощностью 4,8 МВт (2 очередь по 2,4 МВт) утилизирует и будет утилизировать свалочный газ с полигона еще минимум 12 лет, что приведет к значительному снижению неприятного запаха, будет способствовать уменьшению пожароопасности на полигоне и улучшит экологическую обстановку в районе [10].

На полигоне ООО "Новый Свет-Эко" сформированы и работают логистические схемы по обмену материальными потоками. Выполняется научные прикладные исследования в области орнитологии, производства строительных материалов, очистки сточных вод, и др.



Рис. 1. Склаживание древесины и брикетов ПЭТ

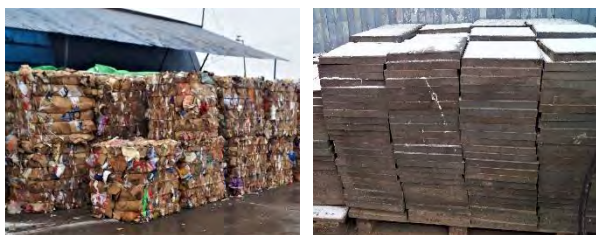


Рис. 2. Склад макулатуры и готовых полимер-минеральных тротуарных плит из утилизированных ПЭТ

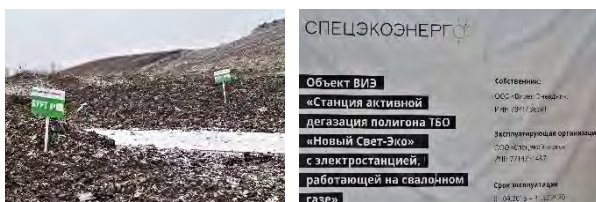


Рис. 3. Бурты компоста и блок станции дегазации полигона "Новый Свет-Эко"

Заключение

На основании проведенных исследований и результатов работы предприятий, такого уровня как полигон "Новый Свет-Эко" (Дегтярев Е.П. и др.) можно сделать вывод о том, что решение проблематики в области обращения с отходами в Санкт-Петербурге, а в частности полигонного захоронения отходов может стать развитием сети экотехнопарков.

Актуальность и необходимость создания таких объектов подтверждается установленными целевыми показателями в стратегических документах Российской Федерации.

Литература

1. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2018 году.
2. Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 29.05.2012 N 524 «О Программе «Региональная целевая программа по обращению с твердыми бытовыми отходами в Санкт-Петербурге на период 2012-2020 годов».
3. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года: Указ Президента РФ от 19 апреля 2017 г. N 176.
4. Государственная программа РФ «Охрана окружающей среды» на 2012 - 2020 годы.
5. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 25 января 2018 г. N 84-р.
6. Паспорт национального проекта «Экология», утвержденный президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 N 16.
7. Скобелев Д.О., Марьев В.А., Потапов Г.Г., Шубов Л.Я., Доронкина И.Г. Создание экотехнопарков - рациональный путь к развитию отрасли комплексной переработки отходов и использования вторичных ресурсов// Экология промышленного производства. – 2018. №2. С. 7-21.
8. Марьев В.А., Смирнова Т.С., Гузб Л.В., Манкулова Ж.А // Национально-правовой аспект в создании условий для развития промышленного симбиоза как одного из основных элементов экологической промышленной политики в Российской Федерации // Менеджмент в России и за рубежом. – 2018. №3 – с.15-28
9. Цуркан М.В., Любарская М.А., Воротникова А.М., Тарасов Б.А.// Управление экотехнопарками Арктической зоны России: развитие в рамках проектных решений// Вестник Российского университета кооперации. – 2019. №1 – с.100-106
10. Сайт АО "Автопарк № 1 "Спецтранс" [The website of JSC "Autopark № 1 "Spetstrans"/ <http://spetst1.ru/deyatelnost/zakhronenie> (Дата обращения 25.03.2020)

References

1. Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Sankt-Peterburge v 2018 godu [Report on the environmental situation in Saint Petersburg for 2018].
2. Postanovlenie Pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 29.05.2012 N 524 «O Programme «Regional'naya tselevaya programma po obrashcheniyu s tverdymi bytovymi otkhodami v Sankt-Peterburge na period 2012-2020 godov» [Resolution of the government of Saint Petersburg dated 29.05.2012 No. 524 "on the program" Regional target program for solid waste management in Saint Petersburg for the period 2012-2020"].
3. Strategiya ekologicheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2025 goda: Ukaz Prezidenta RF ot 19.04.2017 g. N 176 [Strategy of environmental security of the Russian Federation for the period 2025, Decree of the President of the Russian Federation dated 19.04.2017 No. 176].
4. Gosudarstvennaya programma RF «Okhrana okruzhayushchey sredy» na 2012 - 2020 gody [State program of the Russian Federation «Environmental Protection» for 2012-2020].
5. Strategiya razvitiya promyshlennosti po obrabotke, utilizatsii i obezvrezhivaniyu otkhodov proizvodstva i potrebleniya na period do 2030 goda, utverzhdenny rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 25.01.2018 g. N 84-r [Industrial development strategy for processing, utilization and disposal of industrial and consumer waste for the period 2030, decree of the Government of the Russian Federation No. 84-R of 25.01.2018].
6. Pasport natsional'nogo proekta «Ekologiya», utverzhdenny prezidiumom Soveta pri Prezidente RF po strategicheskemu razvitiyu i natsional'nym proektam, protokol ot 24.12.2018 N 16 [Passport of the national project

- "Ecology", approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for strategic development and national projects, Protocol No. 16 dated 24.12.2018].
7. Skobelev D.O., Mar'ev V.A., Potapov G.G., Shubov L.Ya., Doronkina I.G. Sozdanie ekotekhnoparkov - ratsional'nyy put' k razvitiyu otrasli kompleksnoy pererabotki otkhodov i ispol'zovaniya vtorichnykh resursov [The creation of ecotechnoparks is the rational way to develop branch of industry of complex waste and recyclable materials treatment and utilization]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. – 2018. №2. S. 7-21.
 8. Mar'ev V.A., Smirnova T.S., Guzb L.V., Mankulova Zh.A. Natsional'no-pravovoy aspekt v sozdanii usloviy dlya razvitiya promyshlennogo simbioza kak odnogo iz osnovnykh elementov ekologicheskoy promyshlennoy politiki v Rossiyskoy Federatsii. Menedzhment v Rossii i za rubezhom [National legal aspect in creating conditions for the development of industrial symbiosis as one of the main elements of environmental industrial policy in the Russian Federation]. – 2018. №3 – s.15-28
 9. Tsurkan M.V., Lyubarskaya M.A., Vorotnikova A.M., Tarasov B.A. Upravlenie ekotekhnoparkami Arkticheskoy zony Rossii: razvitie v ramkakh proektnykh resheniy. Vestnik Rossiyskogo universiteta kooperatsii [Management of eco-industrial parks in the Arctic zone of Russia: development in the framework of project oriented decisions]. – 2019. №1 – s.100-106
 10. Sait AO «Avtopark №1 «Speztrans»/ <http://spest1.ru/deyatelnost/zakhoroneniye> (data obracheniy 25.03.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT AUTHORS

Герко Айнура Гошга Кызы, старший преподаватель кафедры экологии промышленных зон и акваторий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: gerko.ag@gmail.com

Ainura G.K. Gerko, senior lecturer 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: gerko.ag@gmail.com

УДК 658.5+614.8.067
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.034

Экономическое обоснование затрат на мероприятия по улучшению условий и обеспечению безопасности труда

Г.А. Бронникова¹, Л.В. Бронникова¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В настоящее время эффективность проведения мероприятий, связанных с улучшением условий и обеспечением безопасности труда работников промышленных предприятий, в том числе в судостроительной отрасли, оценивается, главным образом, с применением социальных показателей (сокращение количества рабочих мест с неблагоприятными условиями труда, снижение уровня производственного травматизма, сокращение текучести кадров и другие). Вместе с тем, существует актуальная потребность в оценке экономической эффективности указанных мероприятий, что необходимо для рационального расходования финансовых ресурсов, выделяемых на обеспечение производственной безопасности.

Специалистами профильных организаций были предложены методические разработки в области оценки экономической эффективности мероприятий по улучшению условий труда, но их практическое использование затруднено в связи с отсутствием релевантной методики определения исходных величин для расчета данных показателей. На основе анализа упомянутых разработок, авторы применили к ним результаты собственных исследований и предложили адаптированную методику экономического обоснования рассматриваемых мероприятий. В статье приведена структура затрат на компенсацию негативного воздействия производственной среды на работников. Предложен метод определения значений исходных величин (данных) для расчета показателей социально-экономического эффекта. Приведены показатели, позволяющие учесть влияние рассматриваемых мероприятий на производительность труда, а также оценить сумму экономии расходов на компенсационные выплаты.

Изложенные в статье предложения по расчету социально-экономического эффекта от проектируемых (планируемых) мероприятий по улучшению условий и безопасности труда позволяют повысить точность расчетов и объективность выводов об экономической эффективности рассматриваемых мероприятий. Что, в свою очередь, позволит обеспечить повышение экономической эффективности конечных результатов работы предприятия.

Ключевые слова: методика, производственный травматизм, последствия, эффективность мероприятий, безопасность труда.

Economic justification for the cost of measures to improve conditions and safety of work

Galina A. Bronnikova¹, Liliya V. Bronnikova¹

¹Saint - Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Annotation. Nowadays, the effectiveness of measures related to improving conditions and ensuring the safety of workers of industrial enterprises, also including the shipbuilding industry, is usually rated by using social indicators (reduction in the number of jobs with unfavorable labor conditions, reduction in the level of industrial injuries, staff turnover reduction and others). At the same time, there is an urgent need to assess the cost-effectiveness of these activities, due to the need to rationally spending the financial resources allocated to ensure industrial safety.

Experts of specialized organizations suggested methodological developments for diagnosis economical effectiveness of events to improve jobs condition. Practical usage of these methods is difficult due to the lack of relevant methods for defining initial values which are used in calculations. Based on the analysis of the mentioned developments, the authors applied the results of their own research to them and proposed an adapted methodology for the economic justification of the measures under consideration. The article presents the cost structure for compensating the negative impact of the labor environment on workers. A method for determining the values of the initial values (data) for calculating indicators of the socio-economic effect is presented in article. Demonstrated indicators allow to represent the influence of events on working efficiency and to measure the spend savings on compensative payments.

Described proposals for social-economic event efficiency calculation methodology allow to increase the calculation accuracy and make adequate conclusions of event's social-economy efficiency. This, in turn, will lead to improve the economic effectiveness of the final results of whole enterprise.

Key words: methodology, injury rate, the consequences, the effectiveness of measures, safety of work.

Затраты на мероприятия, связанные с улучшением условий и обеспечением безопасности труда на промышленных предприятиях, в том числе и в судостроительной отрасли, как известно, носят ресурсный характер. Эффективность таких решений оценивается социальными показателями: сокращением количества рабочих мест, не соответствующих нормативным требованиям и численности работающих на таких местах; увеличением количества производственных

мощностей и помещений, приведенных в соответствие с требованиями стандартов безопасности; снижением уровня травматизма, заболеваемости и инвалидизации, связанных с производством; сокращением текучести кадров по причине неблагоприятных условий труда и др. Однако, существует потребность и в экономическом обосновании такого рода мероприятий, обусловленная необходимостью рационального использования и эффективного расходования

финансовых ресурсов, выделяемых на улучшение условий труда и обеспечение производственной безопасности.

На протяжении многих лет экономисты занимались этой проблемой. Выпущен целый ряд методических разработок специалистами НИИ труда, ВЦНИИ охраны труда и др. [1,2,3], опубликованы монографии отдельных авторов [4,5]. Проведя анализ содержания этих разработок, мы попытались применить к ним результаты своих собственных исследований и разработать упрощенную методику экономического обоснования рассматриваемых мероприятий.

Разработка методики включала в себя следующие этапы исследований:

1. Анализ структуры затрат, относящихся к обеспечению безопасности труда и компенсации

негативных воздействий производственной среды, и выявление тех из них, к сокращению которых выделяется финансирование.

2. Анализ показателей, используемых для экономического обоснования мероприятий.

3. Анализ показателей социально-экономического эффекта, на которых отражается результат осуществления мероприятий.

4. Корректировка значений исходных величин для расчета показателей социально-экономического эффекта.

Структура затрат на улучшение условий и обеспечение безопасности труда, характерных для промышленного предприятия, представлена на рис.1.



Рис.1 Структура затрат на обеспечение безопасных условий труда и компенсацию негативных воздействий производственной среды

Для экономического обоснования затрат на мероприятия по улучшению условий и обеспечение безопасности труда предлагается использование известных в экономике показателей:

Годовой экономический эффект, получаемый от осуществления мероприятия:

$$\mathcal{E}_Г = P - Z; \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_Г = P - (C + E_H \cdot K),$$

где P - денежное выражение положительного результата от осуществления мероприятий, руб.

Z - затраты на мероприятие, руб., или приведенные к годовой соразмерности капитальные вложения

$$Z = C + E_H \cdot K,$$

где C - годовые эксплуатационные расходы, руб.;

K - капитальные вложения, руб.; E_H - нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений. $E_H = 0,08$ - для данных мероприятий.

При выборе одного из множества разработанных вариантов мероприятий лучшим из них считается то,

для которого выявлено максимальное значение годового экономического эффекта.

Общая (абсолютная) экономическая эффективность затрат определяется соотношением:

$$\mathcal{E}_o = \frac{P}{Z}.$$

Иногда возникает необходимость определить общую (абсолютную) экономическую эффективность капитальных вложений в мероприятие:

$$\mathcal{E}_K = \frac{P - C}{K}.$$

\mathcal{E}_K - сравнивают с E_H . Капитальные вложения считаются эффективными, если $\mathcal{E}_K > E_H$.

Вычисляют также величину, обратную \mathcal{E}_K , характеризующую срок окупаемости капитальных вложений:

$$T = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_K}.$$

Вложения считаются эффективными, если $T < T_H$ - нормативного срока окупаемости = 12,5 лет.

Как видим, исходной величиной в расчетах всех экономических показателей эффективности является денежное выражение положительного результата от осуществления мероприятия. Однако известно, что такой результат в данных случаях оценивается упомянутыми выше социальными показателями, размерность которых выражается денежным эквивалентом, для чего и были разработаны показатели социально-экономического эффекта.

В основу разработанной нами методики мы выбрали показатели, приведенные в методике НИИ труда [3], в которой все показатели социально-экономического эффекта разделены на две группы: показатели прогнозируемого эффекта, используемые для планируемых и проектируемых решений, и показатели, используемые в производственных решениях.

Данные, используемые в поэлементном расчете экономических потерь предприятия, были представлены в статье: «Методика социально-экономической оценки производственного травматизма судостроительного производства» [6].

В данной статье рассмотрены показатели социально-экономического эффекта, относящиеся к первой группе: повышение производительности труда $\Delta П_{P.C.}$ за счет экономии рабочей силы \mathcal{E}_{Σ} и экономия денежных средств \mathcal{E}_{ϕ} , получаемая по фонду заработной платы высвобождаемых от неблагоприятных условий труда работников $\mathcal{E}_{\phi z}$, а также по оплате временной нетрудоспособности в связи с травматизмом и профессиональными заболеваниями $\mathcal{E}_{\text{вн}}$ и доплатой временных компенсаций к зарплате по условиям труда $\mathcal{E}_{\text{вк}}$.

$$\Delta П_{P.C.} = \frac{\mathcal{E}_{\Sigma}}{Ч_{ПП} - \mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100 \quad (1)$$

где \mathcal{E}_{Σ} - суммарная экономия рабочей силы, чел.; $Ч_{ПП}$ - общая численность производственного персонала, для которого проектируется решение, чел.

Величина \mathcal{E}_{Σ} складывается из: суммы величин возможного высвобождения численности работающих в неблагоприятных условиях $\mathcal{E}_{\text{высв.}}$; сокращения производственного травматизма и профессиональной заболеваемости $\mathcal{E}_{\text{тр.п.з.}}$; сокращения компенсаций за работу в ненормативных условиях труда $\mathcal{E}_{\text{к}}$:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\text{высв.}} + \mathcal{E}_{\text{тр.п.з.}} + \mathcal{E}_{\text{к}}$$

Каждое слагаемое определяется по формулам:

$$\mathcal{E}_{\text{высв.}} = (Ч_{\phi} - Ч_{\text{н}}) \cdot K_{\text{см}}$$

где $Ч_{\phi}$ и $Ч_{\text{н}}$ - численность рабочих, занятых на участке с неблагоприятными условиями труда, для которого проектируется мероприятие, соответственно, до и после его внедрения, чел.;

$K_{\text{см}}$ - коэффициент сменности;

$$\mathcal{E}_{\text{тр.п.з.}} = \frac{Ч_{\text{н}} (D_{\text{тр.}} \cdot П_{\text{тр.}} + D_{\text{пз.}} \cdot П_{\text{пз.}})}{\Phi_{\phi}}$$

где $D_{\text{тр.}}$ и $D_{\text{пз.}}$ - потери рабочего времени из-за производственного травматизма и профессиональной заболеваемости, чел.-дни/чел.;

$П_{\text{тр.}}$ и $П_{\text{пз.}}$ - коэффициенты, учитывающие долю причин, устраняемых проектируемым мероприятием; Φ_{ϕ} - годовой фонд рабочего времени, чел.-дни;

$$\mathcal{E}_{\text{к}} = \mathcal{E}_{\text{высв.}} \cdot \left(\frac{T_{\text{д.о.}}}{\Phi_{\phi}} + \frac{T_{\text{р\phi}} \cdot \Phi_{\phi}}{\Phi_{\text{ч}}} \right),$$

где $T_{\text{д.о.}}$ - средняя продолжительность дополнительного отпуска в базовом периоде, чел.-дни/чел.; $T_{\text{р\phi}}$ - средняя продолжительность сокращения рабочего дня в базовом периоде, час./чел.; $\Phi_{\text{ч}}$ - годовой фонд рабочего времени, чел.-час.

Величина показателя экономии денежных средств \mathcal{E}_{ϕ} определяется тремя составляющими:

$$\sum \mathcal{E}_{\phi} = \mathcal{E}_{\phi z} + \mathcal{E}_{\text{вн}} + \mathcal{E}_{\text{вк}};$$

определяемых по формулам:

$$\mathcal{E}_{\phi z} = \mathcal{E}_{\text{высв.}} \cdot Z_{\text{м}} \cdot T,$$

где $Z_{\text{м}}$ - среднемесячная заработная плата одного высвобождаемого работника, руб./чел.-день; T - продолжительность действия проектируемого решения в отчетном году, месяцев;

$$\mathcal{E}_{\text{вн}} = \mathcal{E}_{\text{высв.}} \cdot ВУТ_{\text{тр.п.з.}} \cdot Z_{\phi},$$

где $ВУТ_{\text{тр.п.з.}}$ - средняя продолжительность временной утраты трудоспособности травмированных и получивших профзаболевания работников, дней/чел.; Z_{ϕ} - среднедневная заработная плата одного работающего, руб./чел.-день.

$$\mathcal{E}_{\text{в.к}} = \mathcal{E}_{\text{высв.}} \cdot (T_{\text{р\phi}} \cdot \Phi_{\phi} \cdot Z_{\text{ч}} + T_{\text{до}} Z_{\phi})$$

где $Z_{\text{ч}}$ - среднечасовая заработная плата одного работающего, руб./чел.-час.

Из всех составляющих показателя социально-экономического эффекта \mathcal{E}_{ϕ} в практических расчетах используются только те величины, которые отражают снижение затрат на компенсацию ненормативных условий труда и последствий их отрицательных воздействий, устраняемые проектируемым решением. Для расчета каждой составляющей потребуется выявление или определение исходных величин, входящих в приведенные выше формулы. Большинство из них выявляется из документов первичного учета или статистической отчетности предприятия, но значение некоторых подлежит уточнению, а формулы – соответствующей корректировке.

Так, к потерям рабочего времени из-за производственного травматизма ($D_{\text{тр.}}$) следует отнести: дни временной потери трудоспособности пострадавшими ($D_{\text{в.н.}}$); дни кратковременной потери трудоспособности микротравмированными ($D_{\text{м.}}$); потери рабочего времени на расследование несчастных случаев ($D_{\text{р.}}$) и на устранение их последствий ($D_{\text{уп.}}$).

В результате исследований получены данные, позволившие определить величины приведенных выше показателей потерь рабочего времени: от 1 случая микротравматизма – 1 чел.-день; число случаев микротравматизма, приходящихся на 1 случай учитываемого травматизма (N), составляет 40; на расследование несчастных случаев микротравматизма - $Ч_M = 1,6$ чел.-дн.; легкого травматизма – $Ч_{Л} = 10,0$ чел.-дн.; тяжелого – $Ч_T = 25,0$ чел.-дн.; на устранение последствий от несчастных случаев микротравматизма $И_M = 1,3$ чел.-дн.; легкого $И_{Л} = 16,0$ чел.-дн.; тяжелого $И_T = 35,5$ чел.-дн.

Таким образом, общая величина потерь рабочего времени, связанных с травматизмом, определяется суммой:

$$D_{mp} = D_{в.н} + D_M + D_P + D_{уп.}$$

Каждое из слагаемых показателя D_{mp} определяется следующим образом: $D_{в.н}$ – по документам предприятия, остальные - по формулам:

$$D_M = 40 \times N \times 1;$$

$$D_P = 1,6 \times N_M + 10 \times N_L + 25 \times N_T;$$

$$D_{уп} = 1,3 \times N_M + 16,0 \times N_L + 35,5 \times N_T.$$

Величина $BVT_{mp,пр.з.}$ из формулы $\Delta_{вн}$, по нашему мнению, должна быть заменена на D_{mp} - величину, определяемую как описано выше.

Теперь о показателе повышения производительности труда за счет экономии рабочей силы $\Delta ПР.С.$ Известно, что его размерность (%) не позволяет его напрямую использовать в расчетах показателей экономической эффективности, поэтому его значение следует перевести в денежный эквивалент. Для этого следует определить объем продукции, приходящейся на рассчитанный процент $\Delta ПР.С.$ в натуральных единицах, и, умножив его на стоимость единицы продукции, получить значение показателя социально-экономического эффекта в рублях.

Изложенные предложения по уточнению и корректировке значений исходных величин, входящих в формулы расчета социально-экономического эффекта проектируемых (планируемых) мероприятий по улучшению условий и безопасности труда, повысят точность расчетов и объективность выводов, которые, в свою очередь, позволят обеспечить повышение социально-экономической эффективности результатов работы предприятия.

Литература

1. НИИ труда ГК СССР по труду и социальным вопросам. Определение эффективности мероприятий по улучшению условий труда. (Межотраслевые методические рекомендации). М. 1979.
2. ВЦПС, Всесоюзный центральный научно-исследовательский институт охраны труда. Методические рекомендации по комплексной оценке социально-экономической эффективности мероприятий по улучшению условий и охраны труда. М. 1985.
3. Межотраслевая методика расчета социально-экономической эффективности от внедрения достижений эргономики в народное хозяйство.- М.: Экономика, 1988.
4. Бронникова Г.А., Бронникова Л.В. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие/Г.А. Бронникова, Л.В. Бронникова.- СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2015. – 192 с.
5. Кульбановская Н.К. Экономика охраны труда.- М.: Экономика, 2011.
6. Бронникова Г.А., Бронникова Л.В. Методика социально-экономической оценки производственного травматизма судостроительного производства. "Морские интеллектуальные технологии" (Санкт-Петербург). Номер: 3-2 (45). Год: 2019. Страницы: 122-126.

References

1. The Institute of Labor of the USSR Group on labor and social issues. Determining the effectiveness of measures to improve working conditions. (Inter-industry guidelines). M. 1979.
2. WCC, All-Union Central Research Institute for Occupational Safety. Methodical recommendations for a comprehensive assessment of the socio-economic effectiveness of measures to improve working conditions and safety. M. 1985.
3. Inter-industry method of calculating socio-economic efficiency from the introduction of ergonomics achievements into the national economy.- M.: Economy, 1988.
4. Bronnikova G.A., Bronnikova L.V. Safety of Life: Training Manual/G.A. Bronnikova, L.V. Bronnikova.- St. Petersburg: Vyd-in STGMTU, 2015. - 192 s.
5. Kulbanowska N.K. Occupational Safety Economy.- M.: Economy, 2011.
6. Bronnikova G.A., Bronnikova L.V. Method of socio-economic assessment of industrial injuries of shipbuilding production. "Marine Intelligent Technologies" (St. Petersburg). Number: 3-2 (45). Year: 2019 Pages: 122-126.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Галина Андреевна Бронникова, кандидат экономических наук, доцент кафедры эргономики, экологии и трудового права Санкт-Петербургский государственный морской технический университет: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3 e-mail: kww@smtu.ru

Galina A. Bronnikova, Ph.D. (Econ), assistant professor of the Department of ergonomics, ecology and labor law of the Saint-Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kww@smtu.ru

Лилия Васильевна Бронникова, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой эргономики, экологии и трудового права, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3 e-mail: bronnikova.lili@gmail.com

Liliya V. Bronnikova, Ph.D. (Econ), assistant professor, head of the Department of ergonomics, ecology and labor law of the Saint-Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation e-mail: bronnikova.lili@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 551.46.077:529.584
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.057

Динамика и акустика кавитационного пузырька при возрастании внешнего давления

К.В. Рождественский¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье приводятся аналитические и численные результаты по динамике и акустике кавитационного пузырька при повышении внешнего давления. В начале рассматривается модельная задача о сжатии пузырька вплоть до коллапса при мгновенном повышении давления. При этом уравнение Рэлея-Плессета рассматривается с учетом газосодержания, поверхностного натяжения и вязкости. Акустическое давление, вызванное сжатием пузырька, записанное в безразмерном виде, определяется как с привлечением формул, так и численным путем. Показано, что если наряду с паром, внутри пузырька имеется некоторое количество газа, скорость его сжатия и акустическое давление оказываются конечными вплоть до полного схлопывания. Кроме того, возможно многократное повторение цикла расширения-сжатия с затуханием амплитуды колебаний. На каждом периоде колебаний вблизи момента времени коллапса (достижения минимального радиуса) наблюдается импульсное возрастание давления. Во второй части аналогичное исследование проводится для случая, когда кавитационный пузырек возникает в закругленной носовой части подводного крылового профиля. При этом демонстрируется зависимость динамического поведения пузырька и вызываемого им в заданной точке контура профиля акустического давления от типа профиля, его толщины и угла атаки. По периоду первого цикла схлопывания спектральные параметры акустического импульса определяются как у эквивалентного треугольного импульса.

Ключевые слова: пузырьковая кавитация, коллапс кавитационного пузырька, спектр кавитационного шума

Dynamics and acoustics of cavitation bubble in adverse external pressure gradient

Kirill V. Rozhdstvensky¹

¹Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation

Abstract. Presented in this paper are analytical and numerical results on dynamics and acoustics of a cavitation bubble in adverse external pressure gradient. First considered is a model problem of bubble collapse due to instantaneous increase of pressure. Therewith, the Rayleigh-Plesset equation is treated with account of gas content, surface tension and viscosity. Non-dimensional acoustic pressure caused by the compression of the bubble, is determined both with use of relevant formulae and numerically. It is shown that if together with vapor the bubble contains some quantity of gas, than its collapse rate and acoustic pressure during compression turn out to be finite. In addition, multiple expansion compression cycles are possible. For each period of bubble radius variation there occurs near the moment of collapse (moment of reaching a minimum radius) an impulse acoustic pressure rise. In the second part of the paper a similar investigation is carried out for the case when the bubble occurs near the rounded leading edge of a hydrofoil. Demonstrated therewith is the dependence of the bubble dynamic behavior and accompanying acoustic pressure pulses upon the foil type, thickness and angle of attack. Based on the period of the first bubble collapse cycle the spectral parameters of the induced acoustic pressure impulse are determined as for an equivalent triangular impulse.

Key words: bubble cavitation, cavitation bubble collapse, cavitation noise spectrum

Введение

Задача об эволюции кавитационного пузырька в переменном поле давления является классической и, по-прежнему, не теряет актуальности, так как, в частности, схлопывание пузырька может сопровождаться специфическим шумом и эрозией материала. Обстоятельный анализ пузырьковой кавитации и ее акустических эффектов содержится в работах [1-6].

В данной статье рассмотрению подлежат два случая. *Первый* соответствует внезапному увеличению внешнего по отношению к пузырьку давления. *Второй* – предполагает движение пузырька в переменном поле давления вблизи контура тонкого подводного профиля в окрестности его закругленной передней кромки. В обоих случаях речь идет об аналитическом (когда это возможно) или численном решении уравнения Рэлея-Плессета

с соответствующей правой частью. В результате решения этого уравнения для пузырька с заданным начальным радиусом и нулевой начальной скоростью его границы определяется зависимость от времени радиуса пузырька и акустическое давление, индуцированное изменением его объема.

Аналитические и численные решения уравнения Рэлея-Плессета

Запишем уравнение Рэлея-Плессета и начальные условия в размерном виде

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = -\frac{P(t)}{\rho}, \quad (1)$$

$$R(0) = R_0, \quad \dot{R}(0) = 0, \quad (2)$$

где $R = R(t)$ - текущий радиус пузырька в m в момент времени t в c , R_0 - начальный радиус пузырька $P(t)$ - давление на границе пузырька в n / m^2 в функции времени, ρ - плотность жидкости в kg / m^3 , точки означают дифференцирование по (размерному) времени. С точки зрения компактного представления расчетных данных по динамике и акустике пузырька удобно привести уравнение Рейля-Плессета к безразмерному виду, вводя в качестве характерного размера и характерного времени параметры R_0 и $R_0 / \sqrt{P_0 / \rho}$. Заметим, что P_0 есть некоторое характерное давление и в соответствии с теорией подобия может быть выбрано удобным образом⁴. Тогда, переходя в (1)-(2) к безразмерному радиусу пузырька η и безразмерному времени τ

$$\eta(\tau) = \frac{R(t)}{R_0}, \quad \tau = \frac{t}{R_0} \sqrt{\frac{P_0}{\rho}}. \quad (3)$$

приходим к следующему безразмерному виду задачи Рейля-Плессета (1), (2).

$$\eta \ddot{\eta} + \frac{3}{2} \dot{\eta}^2 + \pi(\tau) = 0, \quad (4)$$

$$\eta(0) = 1, \quad \dot{\eta}(0) = 0, \quad (5)$$

где $\pi(\tau) = P(\tau) / P_0$.

В практических случаях расширение или сжатие кавитационного пузырька реализуется при его движении в поле переменного во времени давления. При теоретическом исследовании требуется решать уравнение Рейля-Плессета при известной функции $\pi(\tau)$. Последняя может быть определена экспериментальным⁵ или теоретическим путем. Простейший и наиболее исследованный в литературе закон изменения давления, при котором уравнение (4) решается аналитически и численно, соответствует мгновенному увеличению давления вне пузырька.

Случай мгновенного увеличения давления

Полагая, что **внешнее давление мгновенно увеличилось** на величину $P(\tau) = P_0$, приходим к следующему уравнению

$$\eta \ddot{\eta} + \frac{3}{2} \dot{\eta}^2 + 1 = 0, \quad (6)$$

Замечая, что $\eta \ddot{\eta} = \eta \frac{d\dot{\eta}}{d\tau} = \eta \frac{d\dot{\eta}}{d\eta} \frac{d\eta}{d\tau} = \frac{1}{2} \eta \frac{d\dot{\eta}^2}{d\eta}$

найдем

⁴Например,
 $P_0 = p_\infty$

$$\eta \frac{d}{d\eta} \dot{\eta}^2 + 3\dot{\eta}^2 + 2 = 0, \quad (7)$$

Тогда переменные $\dot{\eta}^2$ и η в уравнении (7) разделяются и нетрудно с учетом начальных условий (5) получить интеграл уравнения (6) в виде

$$\dot{\eta}^2(\eta) = \frac{2}{3\eta^3} (1 - \eta^3), \quad \dot{\eta} = \sqrt{\frac{2(1 - \eta^3)}{3\eta^3}} \quad (8)$$

Откуда

$$\frac{d\tau}{d\eta} = \sqrt{\frac{3(1 - \eta^3)}{3\eta^3}} \quad \text{так что можно найти}$$

$$\tau(\eta) = \int_0^\eta \sqrt{\frac{3\eta_1^3}{2(1 - \eta_1^3)}} d\eta_1, \quad (9)$$

что представляет собой зависимость безразмерного времени от относительного радиуса пузырька, а при $\eta = 1$ дает полное безразмерное время эволюции пузырька вплоть до его коллапса, равное

$$\tau_c \approx 0.9146809 \approx 0.915 \quad (10)$$

Таким образом, при изменении безразмерного времени от 0 до τ_c безразмерный радиус пузырька изменяется от 1 до 0. Одновременно, из (8) видно, что вблизи момента схлопывания скорость сжатия пузырька стремится к бесконечности как

$$\dot{\eta} = O(\eta^{-3/2}) \quad (11)$$

Численно обращая зависимость (9), можно построить относительный радиус сжимающегося пузырька в функции от безразмерного времени.

Чтобы устранить бесконечные значения скорости в окрестности коллапса ($\eta = 0$), получающиеся как при аналитическом (8), так и при численном решении уравнения (6), предположим, что кроме насыщенного пара в камере в момент ее замыкания имеется газ. Тогда, в предположении адиабатического сжатия газа пузырька, следуя [1, 2] уравнение (6) можно переписать в виде

$$\eta \ddot{\eta} + \frac{3}{2} \dot{\eta}^2 - \delta_g \eta^{-3\gamma} + 1 = 0, \quad (12)$$

где γ - показатель адиабаты, $\delta_g = p_{g0} / P_0$, а p_{g0} начальное давление газа в пузырьке радиуса R_0 .

Применяя тот же прием, что и при интегрировании уравнения (6), нетрудно получить квадрат скорости границы пузырька в следующем аналитическом виде

$$\dot{\eta}^2 = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \eta^3}{\eta^3} - \frac{\delta_g}{\gamma - 1} (\eta^{-3\gamma} - 1) \right] \quad (13)$$

Полагая $\dot{\eta}(\eta_{\min}) = 0$ можно найти минимальный радиус, до которого сожмется пузырек. Считая, что

⁵ При этом для получения подробной эпюры давления, необходимо предусматривать достаточное количество датчиков

$\eta_{\min} \ll 1$, нетрудно найти

$$\eta_{\min} \approx \left(\frac{\delta_g}{\gamma + \delta_g - 1} \right)^{3(\gamma-1)} \quad (14)$$

При $\gamma = 4/3$ имеем

$$\eta_{\min} \approx \frac{3\delta_g}{1 + 3\delta_g} \quad (15)$$

Для определения радиуса η_* , при котором скорость сжатия пузырька достигнет максимума, приравняем нулю производную по времени выражения (13)

$$\frac{d}{d\tau} \dot{\eta}^2 = 2\dot{\eta}\ddot{\eta} = \frac{d\dot{\eta}^2}{d\eta} \dot{\eta} = 0 \quad (16)$$

Значение η_* найдется из уравнения

$$\frac{d\dot{\eta}^2}{d\eta} = \frac{2}{\eta^4} \left[1 + \frac{\delta_g}{\gamma-1} (1 - \gamma \eta_*^{3(1-\gamma)}) \right] = 0, \quad (17)$$

Откуда

$$\eta_* = \left(\frac{\gamma \delta_g}{\gamma + \delta_g - 1} \right)^{\frac{1}{3(\gamma-1)}} \quad (18)$$

При $\gamma = 4/3$ получим

$$\eta_* = \frac{4\gamma}{1 + 3\delta_g}. \quad (19)$$

Максимальную скорость сжатия пузырька можно вычислить, подставив (19) в (13). Используя выражение (13), можно найти связь между временем τ и относительным радиусом пузырька для случая учета газосодержания по формуле

$$\tau = \int_{\eta_{\min}}^{\eta} \sqrt{\frac{3\eta_1^3}{2[1 - \eta_1^3 - \frac{\delta_g}{\gamma-1}(\eta_1^{3(1-\gamma)} - 1)]}} d\eta_1 \quad (20)$$

Время процесса схлопывания при этом определится как $\tau_c = \tau(1, \eta_{\min})$. В таблице 1 приведены зависимости η_{\min} и τ_c при различных значениях параметра δ_g и $\gamma = 4/3$.

Таблица 1

δ_g	η_{\min}	τ_c
0	0	0.9146809
0.001	0.002991	0.915601
0.005	0.01478	0.919373
0.01	0.02912	0.924271
0.015	0.04306	0.929337

Расчет зависимости радиуса пузырька при заданном газосодержании от времени можно произвести интегрированием уравнения (13) относительно времени τ при $\eta \in [\eta_{\min}, 1]$ или непосредственным численным интегрированием уравнения (12) относительно η по промежутку времени $\tau \in [0, \tau_c]$. На Рис. 1 приведены результаты

численного интегрирования для трех значений δ_g : 0; 0.001; 0.01.

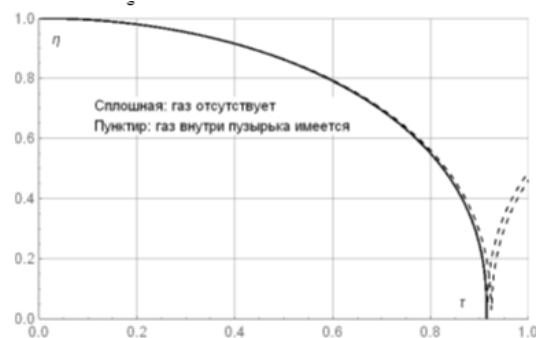


Рис. 1 Динамика пузырька в отсутствие (сплошная) и при наличии (пунктир) газа

Из результатов расчета, приведенных на Рис. 1, следует, что в отсутствие газа ($\delta_g = 0$) сжатие пузырька заканчивается коллапсом и дальнейшего расширения не следует, при наличии в пузырьке газа ($\delta_g \neq 0$) наблюдается тенденция к расширению пузырька, которая развивается в незатухающие колебания.

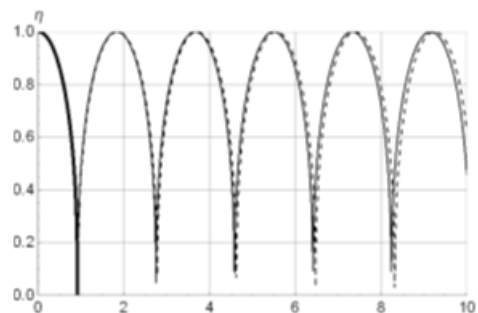


Рис. 2 Незатухающие колебания пузырька при наличии в нем газа (толстая сплошная: $\delta_g = 0$ газ отсутствует, сплошная - $\delta_g = 0.01$, пунктирная $\delta_g = 0.001$)

Представляет интерес учет капиллярности и вязкости, который можно произвести включая в уравнение Релея-Плессета еще два слагаемых, [1,2]

$$\eta \ddot{\eta} + \frac{3}{2} \dot{\eta}^2 - \delta_g \eta^{-3\gamma} + \frac{2D}{\eta} + \frac{C\dot{\eta}}{\eta} + 1 = 0, \quad (21)$$

где параметры D и C выражаются соответственно через коэффициенты динамической вязкости μ и поверхностного натяжения σ жидкости

$$C = \frac{\mu}{R_0 \sqrt{P_0 \rho_0}}, \quad D = \frac{\sigma}{R_0 P_0}. \quad (22)$$

Принимая в первом приближении для целей оценочного расчета: $R_0 = 10^{-5} \text{ м}$,

$P_0 \approx 10^5 \text{ н/м}^2$ при температуре воды 10° C

$\mu = 133.1 \cdot 10^{-5} \text{ кгс} \cdot \text{сек} \cdot \text{м}^{-2}$ и

$$\sigma = 0.0735 \text{ н/м}^2, \text{ получим } D \approx 0.0735 \text{ и } C \approx 0.0168$$

На Рис. 3 для этих данных приведен расчет зависимости радиуса пузырька от времени с учетом газосодержания $\delta_g = 0.001$, вязкости и поверхностного натяжения жидкости

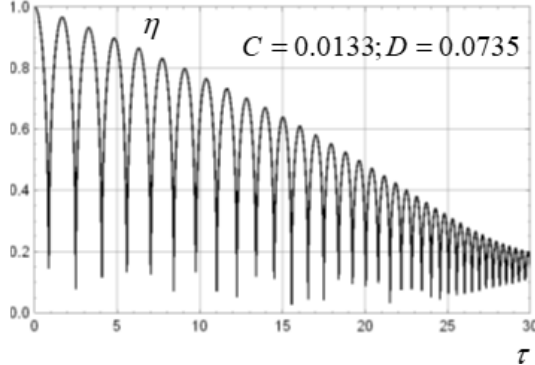


Рис. 3 Затухающие колебания газосодержащего пузырька с учетом влияния капиллярности и вязкости, $\delta_g = 0.001, R_0 = 10^{-5} \text{ м}$

Заметим, что вследствие действия вязкости колебания пузырька становятся затухающими.

Рассмотрение уравнения (21) подсказывает, что при $C = 0$ можно осуществить его аналитическое интегрирование. Используя прием, обсуждавшийся выше, запишем

$$\eta \frac{d\dot{\eta}^2}{d\eta} + 3\dot{\eta}^2 - 2\delta_g \eta^{-3\gamma} + \frac{4D}{\eta} + 2 = 0 \quad (23)$$

Учитывая, что уравнение (23) линейно относительно функции $\dot{\eta}^2$ можно представить его общее решение в виде

$$\dot{\eta}^2 = K\eta^{-3} - \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \frac{\delta_g}{\gamma - 1} \eta^{-3\gamma} - \frac{2D}{\eta}, \quad (24)$$

где первое слагаемое есть однородное решение уравнения (23), остальные удовлетворяют этому уравнению, что нетрудно проверить подстановкой. Найдем постоянную K применяя начальное условие: $\dot{\eta}(1) = 0$, что дает

$$K = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{\delta_g}{\gamma - 1} \right) + 2D \quad (25)$$

Подставляя найденное значение K можно найти другое (отличное от единицы) значение $\eta = \eta_{\min}$, которое соответствует минимальному радиусу пузырька с учетом поверхностного натяжения. Интегрируя (24) относительно времени по промежутку $\eta \in [\eta_{\min}, 1]$, можно найти время

достижения минимального радиуса для газосодержащего пузырька с учетом влияния капиллярности.

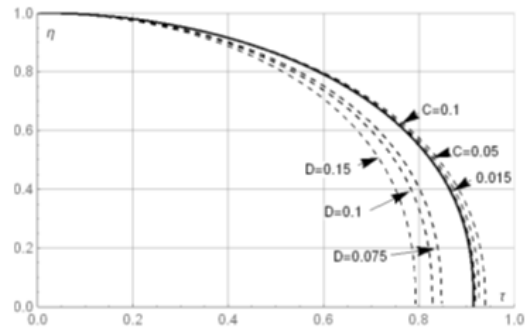


Рис. 4 Влияние вязкости и капиллярности на динамику пузырька при сжатии в отсутствие газосодержания (пунктир), сплошная линия соответствует кривой сжатия пузырька без учета вязкости и капиллярности.

Результаты расчетов путем непосредственного численного интегрирования уравнения (21) без учета газосодержания ($\delta_g = 0$) приведены на Рис. 4, где пунктирные линии над сплошной линией соответствуют учету вязкости без капиллярности ($C \neq 0, D = 0$), а пунктирные линии под сплошной кривой, соответствуют учету капиллярности без вязкости ($C = 0, D \neq 0$). Из Рис. 4 следует, что поверхностное натяжение сокращает период схлопывания пузырька, а вязкость увеличивает его.

Случай движения пузырька в градиентном поле давления вблизи передней закругленной кромки подводного профиля

Исследование сжатия/расширения кавитационного пузырька, движущегося вблизи закругленной кромки крылового профиля в предположении отсутствия газосодержания было выполнено автором в [7]. Здесь, мы возвращаемся к указанной задаче с целью исследования пиковых значений и спектра акустических импульсов, сопровождающих сжатие газосодержащего кавитационного пузырька при различных значениях относительной толщины профиля δ , его угла атаки α и относительной кривизны δ_c . Запишем соответствующее уравнение Рейля-Плессета (в обозначениях, принятых в настоящей статье) в виде

$$\eta \ddot{\eta} + \frac{3}{2} \dot{\eta}^2 - \delta_g \eta^{-3\gamma} + 1 + \frac{p(\tau)}{\kappa} \left(1 - \frac{p_{sv}}{P_0} \right) = 0, \quad (26)$$

где $p(\tau)$ коэффициент давления при движении пузырька вдоль контура профиля, κ - число кавитации, p_{sv} - давление насыщенного пара, смысл параметров δ_g и γ такой же как в уравнении (12).

⁶ Аналогичный подход может быть применен для анализа динамики и акустики пузырька на закругленной входящей кромке гребного винта

Зависимость $p(\tau)$ вблизи передней закругленной кромки имеет параметрический вид, [7]

$$\tau(X) = \pm \frac{r_{le}}{R_0} \sqrt{\frac{\kappa}{2}} \left\{ \frac{1}{U_1^2} \left[2U_1 (\sqrt{X_{ci}} - \sqrt{X}) + \right. \right. \quad (27)$$

$$\left. U_1 (X - X_{ci}) \right] + \frac{1}{U_1} \left(1 + 2 \frac{U_2^2}{U_1^2} \right) \ln \frac{U_1 \sqrt{X} \pm U_2}{U_1 \sqrt{X_{ci}} \pm U_2} \left. \right\}$$

$$p(X) = 1 - \frac{X}{X + \bar{r}_{le}/2} \left(U_1 \pm \frac{U_2}{\sqrt{X}} \right)^2 \quad (28)$$

Выше используются следующие обозначения:

$X = x_{le} / r_{le}$ -растянутая абсцисса, отсчитываемая от вершины кромки, X_{ci} - растянутая абсцисса точки начала кавитации, $\bar{r}_{le} = r_{le} / \delta^2$, r_{le} - кривизны передней кромки, отнесенный к полухорде профиля, $U_1 = 1 + \delta u_\delta$, $U_2 = \bar{\alpha} \sqrt{2} - \delta_c u_c$.

Параметры u_δ и u_c для некоторых семейств аналитических профилей приведены в [7]. В дальнейшем, предполагается, что абсцисса зарождения пузырька совпадает абсциссой минимального давления. Минимальное значение коэффициента давления согласно [7] определяется по формуле

$$p_{\min} = 1 - U_1^2 - \frac{2U_2^2}{\bar{r}_{le}}.$$

Зависимости относительного радиуса пузырька $\eta(\tau)$ при нулевом газосодержании от времени вплоть до схлопывания для эллиптического профиля ($\delta_c = 0, u_c = 0, u_\delta = 1$) при относительной толщине $\delta = 0.1$ приведены в [7]. Как и в более простом случае мгновенного повышения давления (см. выше), используя расширенную запись уравнения Релея-Плессета (26) можно показать, что при любом как угодно малом газосодержании $\delta_g \neq 0$ после первого коллапса пузырька развиваются повторные схлопывания. Процесс становится периодическим и при учете вязкости приобретает затухающий характер.

Вычисление акустического давления и спектральных характеристик коллапса кавитационного пузырька

Наиболее интенсивные, а иногда катастрофические последствия схлопывания пузырьков это шум от импульсных давлений при его сжатии и эрозия материала. В главном приближении акустическое давление представляют членом, обусловленным изменением объема пузырька. Можно показать, что переменное акустическое (размерное) давление в дальнем поле дается формулой

$$p_a = \frac{\rho}{4\pi r} \cdot \frac{d^2 V(t)}{dt^2} = \frac{\rho}{3r} \frac{d^2}{dt^2} R^3(t) = \quad (31)$$

$$\frac{\rho}{r} (2R\dot{R}^2 + 3R^2\ddot{R}),$$

где r есть расстояние между центром пузырька и точкой измерения, а «точки» означают дифференцирование по размерному времени t . Переходя к безразмерным величинам с учетом обозначений, введенных ранее, можно переписать (31) так

$$p_a = \frac{R_0 P_0}{r} (2\eta\dot{\eta}^2 + \eta^2\ddot{\eta}), \quad (32)$$

где «точки» означают дифференцирование по безразмерному времени. Вводя безразмерное акустическое давление

$$\bar{p}_a = \frac{R_0}{r} (2\eta\dot{\eta}^2 + \eta^2\ddot{\eta}) = \frac{R_0}{r} \tilde{p}_a(\tau), \quad (33)$$

где $\tilde{p}_a(\tau)$ - множитель, характеризующий зависимость акустического давления от безразмерного времени. Вычисление спектральных характеристик акустического сигнала, сопровождающего схлопывание пузырька, в общем случае требует применения к зависимости давления от времени интегрального преобразования Фурье. Это, в частности, позволяет определить диапазоны частот, на которых сосредоточена энергия акустического сигнала. Приводимые ниже расчетные данные показывают, что доминирующая интенсивность акустического сигнала при сжатии пузырька наблюдается вблизи момента его коллапса. Для упрощения анализа спектра здесь используется предположение о том, что в главном приближении импульс акустического давления может рассматриваться как треугольный, для которого спектр сигнала в размерных величинах можно записать как

$$|S(i\omega)| = \frac{p_a^{\max} \Delta t_s}{2} \left[\frac{\sin(\omega \Delta t_s / 4)}{\omega \Delta t_s / 4} \right]^2, \quad (34)$$

где $S(i\omega)$ комплексный спектр треугольного сигнала, ω - круговая частота конкретной гармоники в $1/\text{сек}$, Δt_s промежуток времени действия треугольного импульса, p_a^{\max} пиковое значение треугольного импульса. В дальнейшем для удобства пересчета характеристик и в соответствии с теорией подобия, перейдем к безразмерным величинам

$$|\bar{S}(i\bar{\omega})| = \frac{r}{R_0^2 \sqrt{P_0 \rho}} |S(i\omega)| = \quad (35)$$

$$\frac{\tilde{p}_a^{\max} \Delta \tau_s}{2} \left[\frac{\sin(\bar{\omega} \Delta \tau_s / 4)}{\bar{\omega} \Delta \tau_s / 4} \right]^2,$$

В формуле (35), представляющей собой спектр сигнала в безразмерном виде, обозначено: \bar{p}_a^{\max} - безразмерное пиковое значение треугольного импульса, $\bar{\omega}$ - безразмерная круговая частота

конкретной гармонике, $\Delta\tau_s$ - безразмерный временной интервал действия треугольного импульса. Множитель при квадратной скобке в выражении (35) есть безразмерная площадь треугольного импульса, равная

$$\sigma_{\Delta} = \frac{\tilde{p}_a^{\max} \Delta\tau_s}{2}. \quad (36)$$

Рассмотрим характеристики акустического импульса при схлопывании газосодержащего пузырька в конкретных случаях возрастания внешнего давления.

Случай мгновенного увеличения давления

На Рис. 5 приведена зависимость безразмерного акустического давления от безразмерного времени при газосодержании $\delta = 0.001$. Максимальное значение безразмерного акустического давления в данном случае равно $\tilde{p}_a^{\max} = 462.5$, безразмерная площадь импульса получена интегрированием зависимости $\tilde{p}_a(\tau)$ по промежутку $\tau \in [0.90, 0.93]$ и равна $\sigma_{\Delta} = 0.8$. При этом безразмерный промежуток времени действия эквивалентного по площади треугольного импульса определен как $\Delta\tau_s = 2\sigma_{\Delta} / \tilde{p}_a^{\max} = 0.00346$.

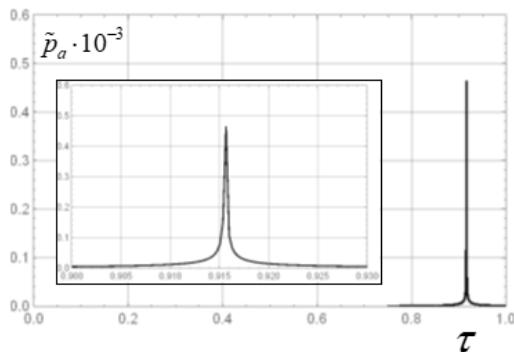


Рис. 5 Зависимость безразмерного акустического давления от безразмерного времени (5.1: на периоде сжатия, 5.2: вблизи момента коллапса пузырька)

Ниже приведен безразмерный спектр этого сигнала

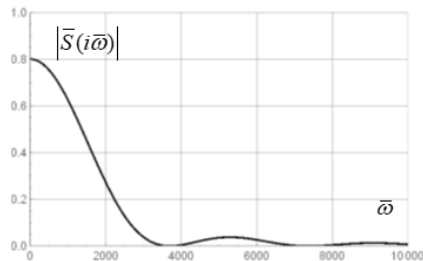


Рис. 6 Спектр акустического импульса при схлопывании газосодержащего пузырька в случае мгновенного увеличения давления.

Случай сжатия пузырька, движущегося по контуру закругленной передней кромки тонкого, малоискривленного подводного профиля под углом атаки

В работе автора [7] для случая тонкого эллиптического с относительной толщиной δ_g получены зависимости радиуса сжимающегося парового пузырька при различных углах атаки α , [4] с. 5. Эти кривые нетрудно воспроизвести на основе уравнения (26) при $\delta_g = 0$.

Используя уравнения (26) и (33) можно рассчитать зависимость безразмерного акустического давления от времени $\tilde{p}_a(\tau)$ для различных углов атаки и относительных толщин профиля. При проведении репрезентативных расчетов параметр газосодержания принимался равным $\delta_g = 0.001$. В ходе расчета, проведенного, в качестве примера, для эллиптического профиля с относительной толщиной $\delta = 0.1$, определялось время коллапса, пиковое значение \tilde{p}_a^{\max} и площадь акустического импульса σ_{Δ} (путем интегрирования эюры $\tilde{p}_a(\tau)$ в окрестности пика). Время эквивалентного треугольного импульса $\Delta\tau_s$ определялось как

$$\Delta\tau_s = \frac{2\sigma_{\Delta}}{\tilde{p}_a^{\max}}. \quad (37)$$

Характерная зависимость $\tilde{p}_a(\tau)$ для $\alpha / \delta = 0.1$ приведена на Рис. 7.

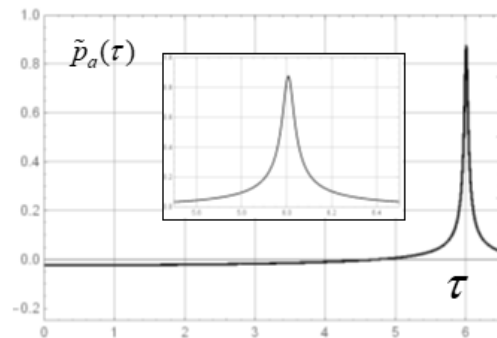


Рис. 7 Зависимость безразмерного акустического давления от времени при схлопывании газосодержащего парового пузырька, движущегося по контуру передней закругленной кромки эллиптического профиля при $\alpha / \delta = 0.1$.

Ниже, в таблице 2 приведены данные проведенного расчета (эллиптический профиль, толщина $\delta = 0.1$.)

Таблица 2

α / δ	τ_c	\tilde{p}_a^{\max}	$\sigma_\Delta \Delta \tau_s$
0.1	5.754	0.872	0.145 0.165
0.3	4.649	8.479	0.159 0.019
0.5	3.790	36.9	0.256 0.0069
0.7	3.361	52.4	0.279 0.0053
1.3	2.911	85.14	0.297 0.00035
Мгн.давл	0.9146	462.5	0.8 0.00346

Спектральные характеристики импульсов, возникающих при схлопывании газосодержащего парового пузырька на эллиптическом профиле под углом атаки приведены ниже

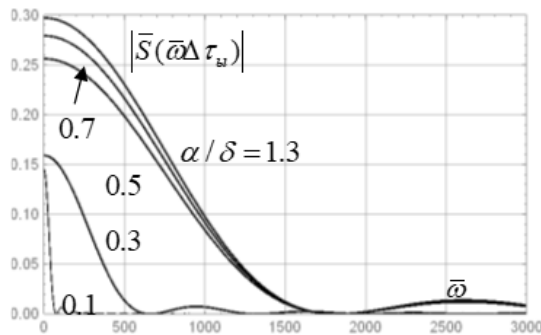


Рис. 8 Спектры акустических импульсов при схлопывании газосодержащего пузырька вблизи закругленной передней кромки эллиптического профиля при различных углах атаки и толщине $\delta = 0.1$

Выводы

В данной работе рассмотрены вопросы динамики и акустики газосодержащего парового пузырька, движущегося в потоке с увеличением давления с применением аналитических и численных методов.

Статья включает ревизию классических результатов, в основном относящихся к процессу сжатия пузырька, внезапно попадающего в зону повышенного давления

Впервые найдены акустические характеристики пузырька, попадающего в зону повышенного давления на контуре закругленной передней кромки тонкого слабоизогнутого профиля под углом атаки.

Результаты включают зависимости акустического давления от времени при сжатии пузырька вплоть до коллапса, а также спектральные характеристики.

Большинство данных приведено в безразмерном виде в духе теории подобия, что способствует компактности представления данных и предоставляет возможности получения размерных характеристик для практических случаев.

Литература

1. Перник А.Д., Проблемы кавитации, Изд-во «Судостроение», 1966, 440 с.
2. Миниович И.Я., Перник А.Д., Петровский В.С. Гидродинамические источники шума, Изд-во «Судостроение», 1972, 478 с.
3. Левковский Ю.Л. Поле давлений, вызванных замыканием кавитационной каверны, - «Акустический журнал», 1968, т. 14, Выпуск 4.
4. Рождественский В.В. Кавитация, Изд-во «Судостроение», 1977, 250 с.
5. Brennen S.E. Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University Press, Inc. 1995, 283 p.
6. Ceccio S.L., Brennen S.E. Observations of the dynamics and acoustics of travelling bubble cavitation, Journal of Fluid Mechanics, 1991, v. 233, pp. 633-660
7. Рождественский К.В. «К задаче о динамике кавитационного пузырька вблизи закругленной носовой части крылового профиля», Морские интеллектуальные технологии, 2(32) Т.1, 2016, сс. 14-19

References

1. Pernik A.D. Problemy kavitatsii [Problems of cavitation], Izd.-vo Sudostroenie, 1966, 440 s.
2. Miniovich I.Ya., Pernik A.D., Petrovskiy V.S. Gidrodinamicheskiye istochniki shuma [Hydrodynamic sources of noise], Izd.-vo Sudostroenie, 1972, 478 s.
3. Levkovskiy Yu.L. «Pole davleniy, vyzvannikh zamykaniem kavitatsionnoi kaverny [Pressure field caused by the collapse of the cavitation cavern]», - Akusticheskiy zhurnal, 1968, tom 14, vyp, 4
4. Rozhdestvenskiy V.V. Kavitatsiya [Cavitation], Izd.-vo Sudostroenie, 1977, 250 s.
5. Brennen S.E. Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University Press, Inc. 1995, 283 p.
6. Ceccio S.L., Brennen S.E. Observations of the dynamics and acoustics of travelling bubble cavitation, Journal of Fluid Mechanics, 1991, v. 233, pp. 633-660
7. Rozhdestvenskiy K.V. K zadache o dinamike kavitatsionnogo pusyirka vblizi zakruglennoi nosovoi chasti krilovogo profilya [To the problem of dynamics of a cavitation bubble near a rounded leading edge of a hydrofoil], Morskiye intellektualniye tekhnologii, 2(32), t. 1, 2016, ss. 14-19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кирилл Всеволодович Рождественский, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Прикладной математики и математического моделирования, проректор по международному сотрудничеству в области науки и образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kvrxmas@yahoo.com

Kirill V. Rozhdestvensky, Honored Scientist of the Russian Federation, Dr. Sci. (Eng), Professor, Vice-Rector for International Science and Education, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kvrxmas@yahoo.com

УДК 537.84

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.035

Генерация электромагнитного поля в проводящей среде, вызванная колебаниями заряженного тела

С.Ю. Маламанов¹, В.А. Павловский²¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В последнее время большую популярность приобретают численные методы исследования, как некая альтернатива дорогих и трудоемких экспериментальных методов. Современные вычислительные комплексы позволяют проводить анализ научно – технических задач в самых разных областях практической деятельности.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования генерации электромагнитного поля, обусловленной движением твёрдого заряженного тела, в вычислительной среде ANSYS.CFX. Этим телом является шар, совершающий колебания в жидкости переменной плотности. Модельная постановка задачи позволяет лучше понять механизм генерации электромагнитного поля, который сопровождает движение твёрдого тела в проводящей среде. Рассматриваемое твердое тело моделируется набором 2D областей, формирующими его поверхность, при этом сетка движется по поверхности твёрдого тела в соответствии с решением уравнений динамики последнего. Решение уравнений прямолинейного движения выполняется дискретизацией по неявной схеме интегрирования Ньюмарка. При этом используется 2й порядок точности.

Для расчета электромагнитного поля решалась система уравнений Максвелла, адаптированная в вычислительную структуру комплекса ANSYS.

Ключевые слова: численное моделирование, проводящая жидкость, скорость потока, магнитное поле, твёрдое тело, колебания, математическая модель

Generation of an electromagnetic field in a conducting medium caused by oscillations of a charged entity

Stepan Yu. Malamanov¹, Valery A. Pavlovsky²¹Baltic State Technical University "VOENMECH" named after D.F. Ustinov²St. Petersburg State Marine Technical University

Abstract. Recently, numerical research methods, as a kind of alternative to expensive and time-consuming experimental methods, have gained great popularity. Modern computer systems allow performing the analysis of scientific and technical problems in various fields of practical activity.

This paper presents the results of a numerical simulation of electromagnetic field generation due to the motion of a solid charged entity in the ANSYS.CFX computing environment. This entity is a ball oscillating in a fluid of variable density. The model statement of the problem makes it possible to better understand the mechanism of electromagnetic field generation, which accompanies the motion of a solid in a conducting medium. The considered solid is modeled by a set of 2D sections forming its surface, while the grid moves along the surface of the solid in accordance with the solution of the dynamics equations of the latter. The solution of the equations of rectilinear motion is performed by discretization according to the implicit Newmark integration scheme. In this case, the second order of accuracy is used. To calculate the electromagnetic field, the Maxwell system of equations was used, adapted to the computational structure of the ANSYS complex.

Key words: numerical simulation, conductive fluid, flow rate, magnetic field, solid, oscillations, mathematical model

Введение

Исследование Мирового Океана является многоплановой проблемой, имеющей как научную, так прикладную стороны. В этой связи, знание характеристик движения морской воды (проводящей среды), необходимо для решения многих актуальных задач современной гео- и гидрофизики. Это знание необходимо для всестороннего изучения индуцированного электромагнитного поля и определения параметров источников волн естественного и искусственного происхождения по электромагнитному эффекту вызванного им волнения. Возможность определения характеристик движения морской среды по её электромагнитному полю является одной из основных комплексных задач морской электродинамики. В этой связи, измерения и вычисления индуцированного электромагнитного поля, носят как фундаментальный, так и сугубо прикладной аспект в

современных геофизических исследованиях. В частности, весьма насущна проблема определения параметров искусственного источника волн, по электромагнитному эффекту вызванного им волнения. В настоящее время задача определения индуцированного электромагнитного поля естественным образом распадается на две части: определение поля скоростей волнения и нахождение по заданному полю скоростей электромагнитного возмущения. При этом скорость движения среды находят или из результатов натуральных наблюдений, или из решения гидродинамической задачи, в которой жидкость считают несжимаемой и невязкой. В этой связи применение комплекса ANSYS, как современной технологии математического моделирования, могло бы позволить ставить и решать многие комплексные научные и технические задачи морской гео- и гидрофизики, среди которых особенно актуальны в настоящее время следующие:

создание аппаратуры для изучения и измерения электрического и магнитного полей в воде; исследование электрических явлений в море для определения их связи с другими физическими процессами; изучение магнитогидродинамических процессов, возникающих из-за движения морской воды в магнитном поле Земли и многие другие.

Моделирование движения твёрдого тела

Сложный характер взаимодействия гидродинамического и электромагнитного полей обуславливает необходимость рассмотрения достаточно упрощенных моделей, которые, однако, «схватывают» суть и описывают основные закономерности изучаемых явлений. В данной работе рассматривается колебательное движение твёрдого тела – шара – и обусловленное этим движение присоединённой массы жидкости. Так, твёрдое тело плотностью немного большей плотности воды, под действием силы тяжести и силы Архимеда погружается и достигает локальной области, плотность которой выше как плотности тела, так и воды. Это иллюстрирует рисунок 1.

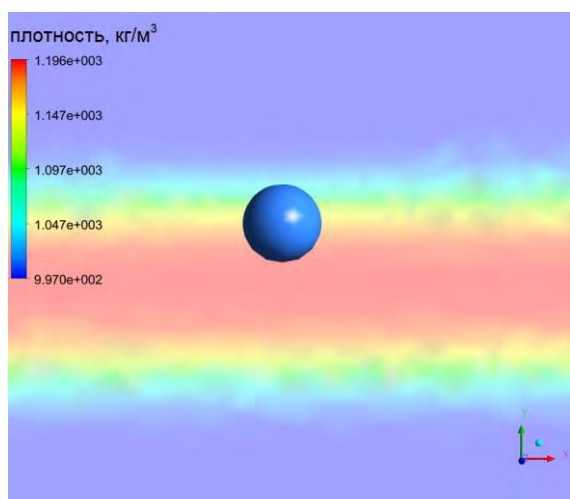


Рис. 1. Твёрдое тело и область локального изменения плотности

Например, в океане это может быть следствием смещения слоёв воды, когда более холодные (или солёные) массы, а значит и более плотные, поднимаются вверх и замещают собой более тёплые (лёгкие) массы. Попав в такую область, тело тормозится, и начинает всплывать, так как сила Архимеда становится больше силы тяжести. При всплытии тело вновь попадает в область более лёгкой жидкости и вновь начинает тонуть и так далее. В нашем случае, рассматриваются колебательные смещения относительно малой амплитуды. На рисунке 2 хорошо видно как шар «толкает» жидкость впереди себя – с одной стороны, а с другой – жидкость стремится заполнить «освободившуюся» область и движется преимущественно в противоположном направлении. Вектора, указывающие направление движения жидкости нормализованы.

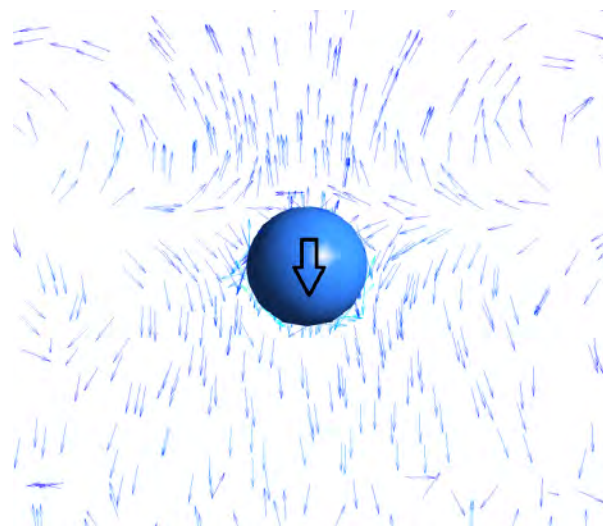


Рис. 2. Поле скорости жидкости при движении шара вниз

Движение шара, под действием силы тяжести и силы Архимеда в среде с переменной плотностью, носит колебательный характер. Это иллюстрирует рисунок 3.

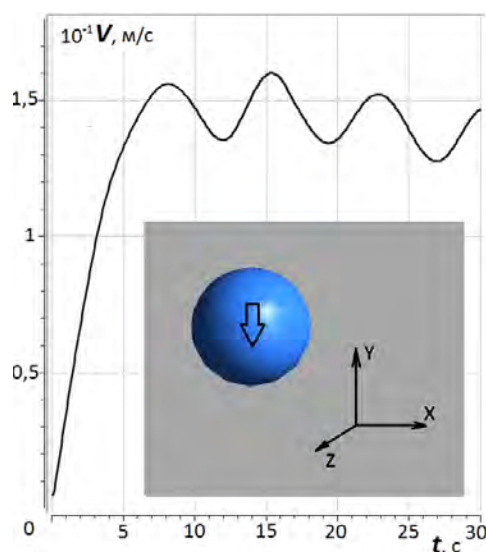


Рис. 3. Изменение скорости центра масс шара во времени.

На этом рисунке по горизонтальной оси отложено время, а по вертикальной – скорость движения центра масс шара.

Моделирование колебаний заряженного шара

В дальнейшем, считаем, что шар заряжен положительным зарядом, а жидкостью является морская вода (проводящая среда). Таким образом, колеблющийся заряд можно рассматривать как своеобразный «диполь». Здесь уместно напомнить классическую задачу о покоящемся диполе с электрическим моментом, меняющемся со временем по закону

$$\vec{p}(t) = q \cdot \vec{l} \cos \omega t,$$

где модуль вектора $|\vec{l}|$ – это амплитуда колебаний заряда q , ω – угловая частота колебаний.

Эти колебания генерируют в окружающем пространстве электромагнитное поле [2]. Такой диполь является простейшей моделью источника электромагнитных волн и называется диполем Герца. В радиотехнике диполь Герца подобен небольшой антенне, размер которой много меньше длины волны. Кроме того, колеблющийся диполь называют осциллятором, или элементарным вибратором. Осцилляторами широко пользуются в физике моделирования и расчета полей излучения реальных систем [3].

Моделирование осуществлялось на основе нестационарных уравнений магнитной гидродинамики, реализованных в ANSYS.CFX и представляющих собой систему уравнений Максвелла и уравнений гидродинамики. Эта система уравнений и некоторые особенности постановки задачи численного моделирования взаимодействия электромагнитного и гидродинамического полей рассмотрены в [4]. Взаимосвязь уравнений электро- и гидродинамики обусловлена необходимостью учитывать генерацию тока и магнитных вариаций из-за движения проводящей среды. Потенциал шара поддерживался постоянным 200 В, коэффициент электропроводности морской воды равен 5 См/м.

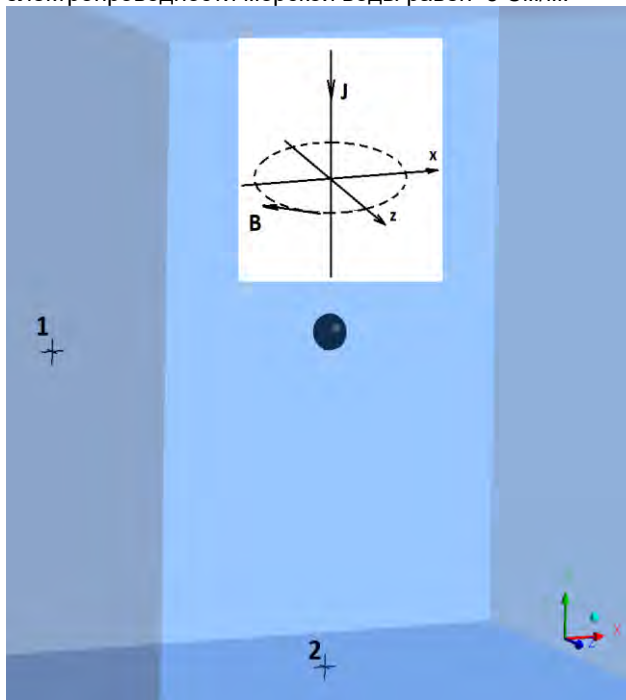


Рис. 4. Схема расчётной области

Часть расчётной области, представляющая собой куб, показана на рисунке 4. На нём виден шар и две точки с номерами «1» и «2». Одна из точек расположена на вертикальной оси симметрии на расстоянии 9 метров вниз от положения равновесия колеблющегося шара, а другая точка – на таком же расстоянии на горизонтальной прямой, перпендикулярной оси Y. В этих точках проводились «наблюдения» изменения физической обстановки, в частности индуцированного электромагнитного поля, во времени. Индуцированное магнитное поле является следствием движения заряженного шара. Для пояснения этого, начнём с бесконечного прямого провода, по которому течёт постоянный ток J. Как известно, он порождает магнитное поле, линии,

индукции которого представляют собой концентрические окружности в плоскостях, перпендикулярных проводу; схематически это показано в верхней части рисунка. При этом модуль индукции одинаков во всех точках выделенной окружности – пунктирная линия.

Наблюдаемое колебательное движение заряженного тела «можно» рассматривать как переменный ток. Именно этот ток и вызывает изменение электромагнитной «обстановки» в окружающем пространстве. Это обстоятельство иллюстрируют рисунки 5 и 6.

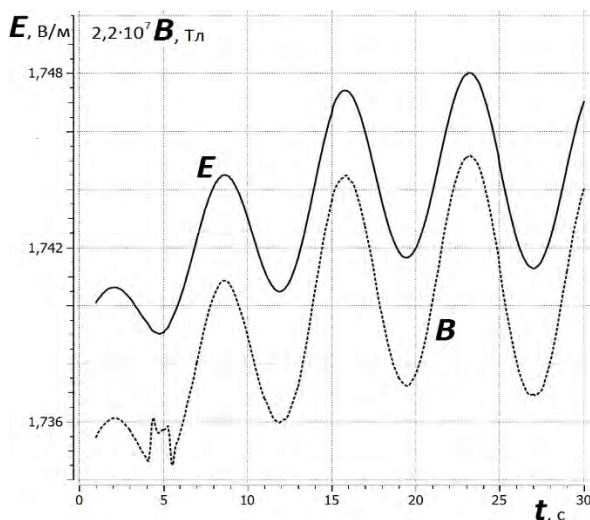


Рис. 5. Изменение характеристик электромагнитного поля в точке «2».

По оси ординат отложены, приведённые к единому диапазону изменений, напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля, по оси абсцисс – время.

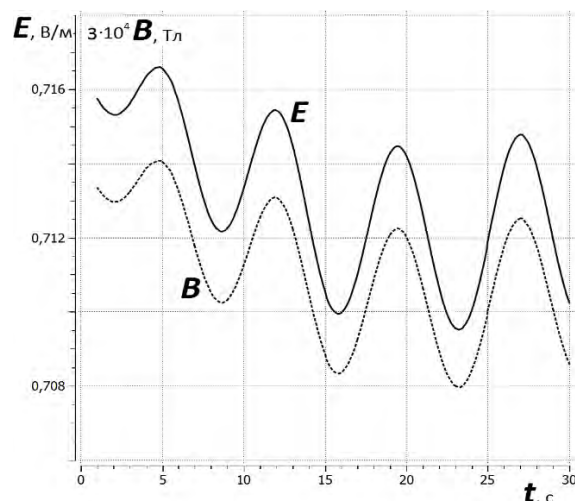


Рис. 6. Изменение характеристик электромагнитного поля в точке «1».

Анализ поведения кривых на приведенных рисунках позволяет сделать некоторые выводы. Оказалось, что величина индуцированного поля мала. Этому есть, по меньшей мере, два объяснения.

Во-первых, проводимость морской воды относительно невелика. Во-вторых, и это главное, в поставленной задаче первоначально нет электрического тока (поля) – основного источника магнетизма [2] и «затравочного» внешнего магнитного поля. Индуцированное поле возникает только благодаря движению проводящей среды, из-за колебаний в ней твёрдого заряженного тела. Здесь следует отметить, что современная геофизическая аппаратура обладает высокой чувствительностью и позволяет измерять магнитные поля с индукцией в десятые и сотые доли магнетесла [5]. Кроме того, видно, что электрическое и магнитное поля изменяются синфазно, как и должно быть в электромагнитной волне.

Хорошо видна «связь» положения точки наблюдения, с различием значений характеристик индуцированного электромагнитного поля. В точке «1» индуцированное магнитное поле на несколько порядков больше по сравнению с полем, наблюдаемым в точке «2». Объяснение этому

следует из того факта, что в точке наблюдения, расположенной в направлении тока (рис.2) магнитное поле равно нулю; в нашем случае ток обусловлен движением тела конечных размеров, что и вызывает отличное от нуля значение индуцированного поля. Обращает на себя внимание ещё одно обстоятельство: там, где магнитное поле больше (точка «1») – электрическое поле меньше и наоборот.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о том, что численное моделирование с помощью МГД-уравнений позволяет находить индуцированное электромагнитное поле, вызванное движением заряженного тела в проводящей жидкости, причём величина этого поля существенно зависит от точки «наблюдения». Этот факт имеет как чисто научное, так и прикладное значение.

Литература

1. Савченко В.Н., Смагин В.П., Фонарев Г.А. Вопросы морской электродинамики – Владивосток: Изд-во ВГУ ЭиС, 1999. – 208 с.
2. Френкель Я.И. Электродинамика. Том 1. Общая теория электричества ОНТИ, 1934. – 428с.
3. Харкевич А.А. Основы радиотехники – 3-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 512 с.
4. Маламанов С.Ю. Численное моделирование задач о силовом взаимодействии гидродинамического и электромагнитного полей // Известия РАН. Математическое моделирование. 2015 год. Том 27. №11. С. 56-62.
5. Геомагнитные возмущения от импульсных источников: Монография/ под ред. Т.А. Семеновой. М.: НИЯЦ МИФИ, 2009. – 420 с.

References

1. Savchenko V.N., Smagin V.P., Fonarev G.A. Voprosy morskoy elektrodinamiki [Questions of marine electrodynamics] – Vladivostok: Izd-vo VGU EiS, 1999. – 208 s.
2. Frenkel' YA.I. Elektrodinamika. Tom 1. Obshchaya teoriya elektrichestva [Electrodynamics. Volume 1. The general theory of electricity] . ONTI, 1934. – 428s.
3. Kharkevich A.A. Osnovy radiotekhniki [Fundamentals of Radio Engineering] . – 3-ye izd., ster. – M.: FIZMATLIT, 2007. – 512 s.
4. Malamanov S.YU. Chislennoye modelirovaniye zadach o silovom vzaimodeystvii gidrodinamicheskogo i elektromagnitnogo poley [Numerical simulation of problems on the force interaction of hydrodynamic and electromagnetic fields] // Izvestiya RAN. Matematicheskoye modelirovaniye. 2015 god. Tom 27. №11. S. 56-62.
5. Geomagnitnyye vozmushcheniya ot impul'snykh istochnikov: Monografiya [Geomagnetic disturbances from pulsed sources] / pod red. T.A. Semenovoy. M.: NIYATS MIFI, 2009. – 420 s

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Степан Юрьевич Маламанов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Механика деформируемого твёрдого тела», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова. 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1 e-mail: stevmal@mail.ru

Валерий Алексеевич Павловский, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Теплофизические основы судовой энергетики». Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. 190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3. e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Stepan Y. Malamanov, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor of the Department of “Mechanics of a deformable solid”, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova. 190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya St., 1 e-mail: stevmal@mail.ru

Valery A. Pavlovsky, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Professor of the Department of Thermophysical Basics of Ship Energy. St. Petersburg State Marine Technical University. 190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3. e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com



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 www.morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов»

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по 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**